

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**LUCAS SILVA BORNE**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**

Porto Alegre

2010

**LUCAS SILVA BORNE**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

**ORIENTADOR:** Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2010

LUCAS SILVA BORNE

## **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS  
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Rafael Boldori, UFRGS  
Graduado pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS  
Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia

Porto Alegre, Dezembro de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, que também frequentaram esta universidade.

Dedico aos meus amigos, pela ajuda em momentos difíceis.

Dedico aos meus colegas, futuros companheiros de profissão.

E dedico principalmente para minha querida Juliana.

## **RESUMO**

Este projeto tem como objetivo compilar e avaliar diversas metodologias de eficiência energética, aplicadas em instalações elétricas. Apresenta um panorama do consumo energético atual, as tendências de consumo e as previsões para os próximos anos. As metodologias de eficiência energética analisadas são: dimensionamento econômico de condutores, luminotécnica com ênfase em eficiência energética e vários métodos de eficiência energética de motores e transformadores. No fim, é apresentada uma série de ilustrações que resumem parte dos dados coletados e analisados.

**Palavras-chave:** Eficiência energética. Instalações elétricas. Dimensionamento econômico de condutores. Luminotécnica. Eficiência de motores e transformadores.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Apresentação	10
1.2	Estudo do cenário energético	10
1.3	Eficiência energética	16
1.4	Empresas de serviços de conservação de energia	18
1.5	Órgãos reguladores	19
1.6	Selos certificadores	21
1.6.1	Energy Star	22
1.6.2	Tjänstemännens centralorganisation	23
1.6.3	CONPET e PROCEL	24
<b>2</b>	<b>DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES</b>	<b>26</b>
2.1	Introdução e conceitos	26
2.2	Modelos matemáticos	27
2.2.1	Resistência e resistividade	27
2.2.2	Perdas na frequência fundamental	30
2.2.3	Perdas na presença correntes harmônicas	31
2.3	Método para o dimensionamento econômico de condutores	33
2.4	Estudo de caso – Iluminação pública	38
2.5	Estudo de caso – Instalação elétrica predial	42
2.6	Estudo de caso – Alimentador de um quadro de distribuição	45
2.7	Conclusão	45
<b>3</b>	<b>LUMINOTÉCNICA COM ÊNFASE EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA</b>	<b>47</b>
3.1	Introdução	47
3.2	Conceitos básicos & Unidades	47
3.2.1	Intensidade Luminosa	48
3.2.2	Fluxo Luminoso	49
3.2.3	Eficiência energética (de fontes luminosas)	49
3.2.4	Iluminância	49
3.2.5	Luminância	50
3.2.6	Índice de reprodução de cor	51
3.3	Tipos de lâmpadas e luminárias	52
3.4	Métodos de cálculo luminotécnico	53
3.4.1	Método dos lúmens	53
3.4.2	Método Ponto a Ponto	56
3.4.3	Aspectos econômicos da luminotécnica	57
3.5	Índice para escolha de lâmpadas e luminárias	61
3.6	Estudo de caso – comparação de custos de sistemas de iluminação	63
3.6.1	Avaliação dos resultados obtidos	64
3.7	Tópico especial – Diodos Emissores de Luz	65
3.7.1	Características vantajosas de LEDs	66
3.7.2	Características desvantajosas de LEDs	67

<b>4.</b>	<b>EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES E TRANSFORMADORES</b>	<b>68</b>
4.1	Introdução	68
4.2	Eficiência energética em motores elétricos	69
4.2.1	Perdas em máquinas elétricas	69
4.2.2	Solução do fluxo ótimo	73
4.2.3	Aspectos do revestimento em máquinas elétricas	73
4.2.4	Acionamentos de velocidade variável	74
4.2.5	Exemplos de melhorias em sistemas motrizes industriais	75
4.3	Eficiência energética em transformadores	76
4.3.1	Normatização das perdas do transformador pela ABNT	77
4.3.2	Rendimento e regulação	78
4.3.3	Perdas e eficiência	80
4.3.4	Soluções para melhorar a eficiência de transformadores	81
4.4	Fator de Potência em máquinas elétricas	82
4.4.1	Causas de um baixo fator de potência	83
4.4.2	Consequências de um baixo fator de potência	84
4.4.3	Vantagens da correção do fator de potência	84
4.4.4	Métodos para correção do fator de potência	85
<b>5.</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS DE DESPERDÍCIO</b>	<b>89</b>
5.1	Introdução	89
5.2	“Mapa” do desperdício - Residencial	90
5.3	“Mapa” do desperdício - Comercial	91
5.2	“Mapa” do desperdício – Industrial	92
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>95</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Consumo de energia e PIB do Brasil. ....	11
Figura 2 – Projeções de consumo de energia para 2030.....	11
Figura 3 – Eficiência energética de continentes .....	12
Figura 4 – Gráfico de consumo de energia x PIB – por país.....	13
Figura 5 – Tarifas diferenciadas por classe de consumo .....	14
Figura 6 – Trechos do balanço energético nacional de 2010 .....	15
Figura 7 – Programas de eficiência energética no Brasil .....	17
Figura 8 – Classificação de motores pela sua eficiência .....	20
Figura 9 – Logotipo do selo Energy Star.....	22
Figura 10 – Logotipo do selo TCO.....	23
Figura 11 – Logotipos do selo CONPET e PROCEL .....	24
Figura 12 – Relação entre resistência equivalente e frequência.....	32
Figura 13 – Custos iniciais relacionados a cabos .....	35
Figura 14 – Seção econômica de um condutor.....	35
Figura 15 – Ilustração do sistema de iluminação pública.....	39
Figura 16 – Modelo para estudo de instalação elétrica predial. ....	42
Figura 17 – Modelo da sala de aula padrão estudada.....	43
Figura 18 – Pontos de luz e força da sala segundo NBR5444.....	44
Figura 19 – Diagrama polar de intensidade .....	48
Figura 20 – Exemplo de tabela com o Fator de Utilização .....	54
Figura 21 – Planilha para cálculo de custo de sistema de iluminação.....	60
Figura 22 – Cálculo de iluminâncias com o software SOFTLUX .....	61
Figura 23 – Custos de sistemas de iluminação .....	64
Figura 24 – Perdas máximas de um transformador definidas pela NBR 5440.....	77
Figura 25 – Curva de rendimento do transformador .....	79
Figura 26 – Bancos de capacitores .....	86
Figura 27 – “Mapa” do desperdício de uma residência.....	90
Figura 28 – “Mapa” do desperdício de um edifício comercial.....	91
Figura 29 – “Mapa” do desperdício de uma indústria.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de energia por setor – uso final. ....	15
Tabela 2 – Novos valores de rendimento para motores regulamentados pela IEC. ....	22
Tabela 3 – Metas para o selo Energy Star de edificações. ....	24
Tabela 4 – Valores típicos de resistividade por material. ....	28
Tabela 5 – Resistência em corrente contínua para condutores classe 5. ....	28
Tabela 6 – Dados iniciais calculados para o caso de iluminação pública. ....	40
Tabela 7 – Valores de seção calculados para o caso de iluminação pública. ....	40
Tabela 8 – Valores comparativos de custos do caso de iluminação pública. ....	41
Tabela 9 – Custos relativos dos sistemas calculados. ....	41
Tabela 10 – Valores iniciais para caso de instalação elétrica predial. ....	44
Tabela 11 – Resultados obtidos para caso de instalação elétrica predial. ....	44
Tabela 12 – Compilação de casos verificados. ....	45
Tabela 13 – Níveis de índice de reprodução de cor. ....	51
Tabela 14 – Características de lâmpadas. ....	52
Tabela 15 – Valores do fator de depreciação. ....	55
Tabela 16 – Dados das lâmpadas utilizadas no sistema. ....	63
Tabela 17 – Índice de prioridade e Densidade de potência relativa calculados. ....	64
Tabela 18 – Exemplos de economia de energia em sistemas de acionamento de motores. ....	76
Tabela 19 – Metodologias de bancos de capacitores (correção mista). ....	87

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

IDH: Índice de Desenvolvimento Humano

PIB: Produto Interno Bruto

IEC: International Electrotechnical Commission

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

NBR: Norma Brasileira

ESCO: Empresa de Serviço de Conservação de Energia

TCO: Tjänstemännens Centralorganisation

ENCE: Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

PROCEL: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

LED: “Light Emitting Diode”, ou Diodo Emissor de Luz

AT/MT/BT: Alta/Média/Baixa Tensão

## **1. INTRODUÇÃO**

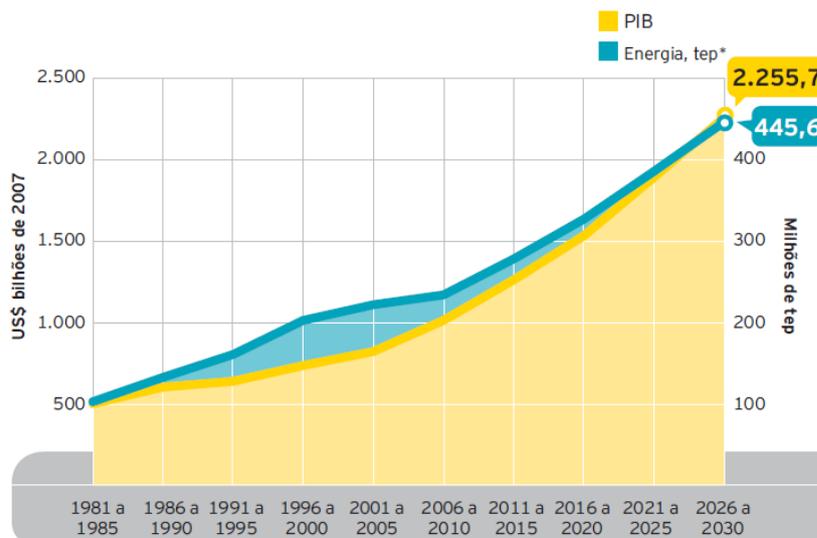
### **1.1 Apresentação**

Este projeto de diplomação apresenta o resultado final da pesquisa e trabalho realizados pelo aluno durante o seu último semestre no curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O objetivo é pesquisar e analisar os modelos matemáticos e métodos utilizados em efficientização energética de instalações elétricas.

Primeiramente, será apresentado um panorama do cenário energético e dos órgãos e empresas que nela atuam. Em seguida, serão analisados os métodos de dimensionamento econômico de condutores, luminotécnica com ênfase em eficiência energética e métodos de eficiência energética em cargas indutivas. Finalmente, é apresentado um tópico que compila boa parte das informações apresentadas anteriormente de forma diferenciada, seguida das conclusões do projeto.

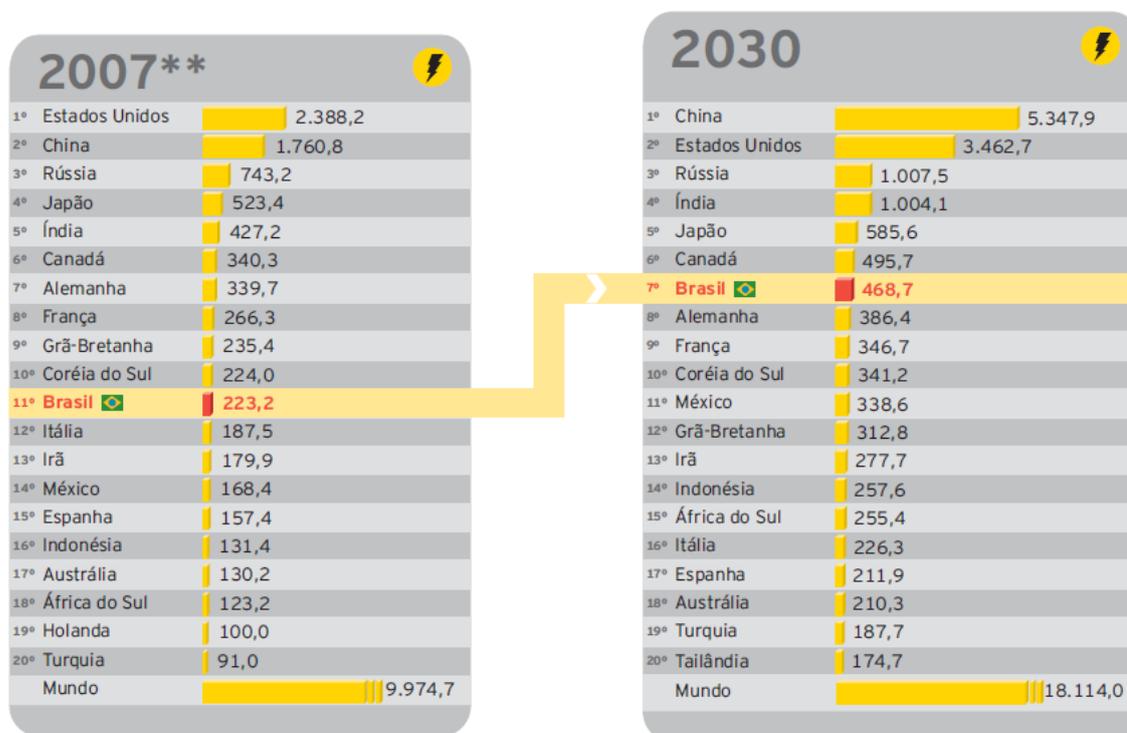
### **1.2 Estudo do cenário Energético**

Para perceber a necessidade de implementar programas de eficiência energética, e seus consequentes benefícios, deve-se começar pela análise de dados relativos ao cenário energético atual. Tais dados são apresentados em gráficos e tabelas, que foram selecionados, organizados e posteriormente comentados.



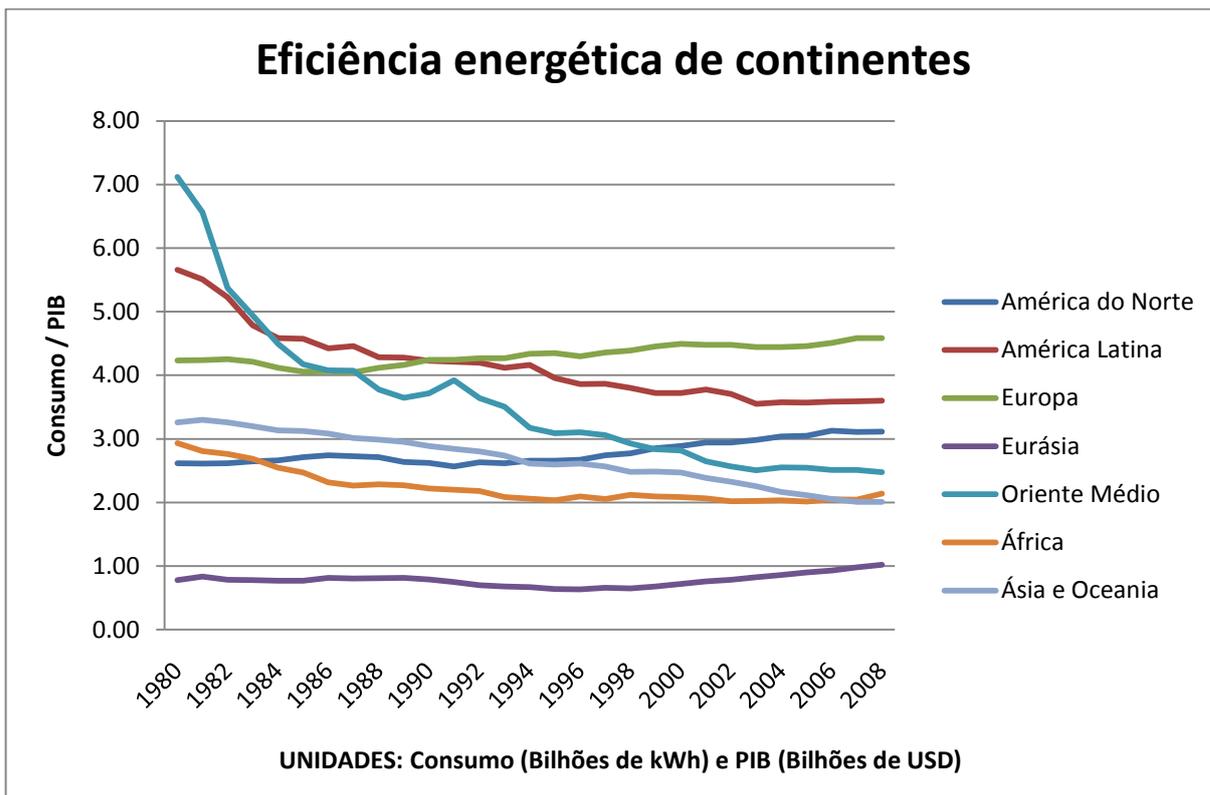
**Figura 1 – Consumo de energia e PIB do Brasil [1]**

De acordo com a figura 1, pode-se ver que a demanda de energia cresce junto com o PIB, em uma razão aproximadamente linear. Na figura 2, vê-se a projeção de que o Brasil irá assumir uma posição de destaque no que se refere ao cenário econômico e energético.



Fonte: FGV  
 (\*) Oferta primária de energia, em milhões de toneladas equivalentes de petróleo. (\*\*) Estimativa.

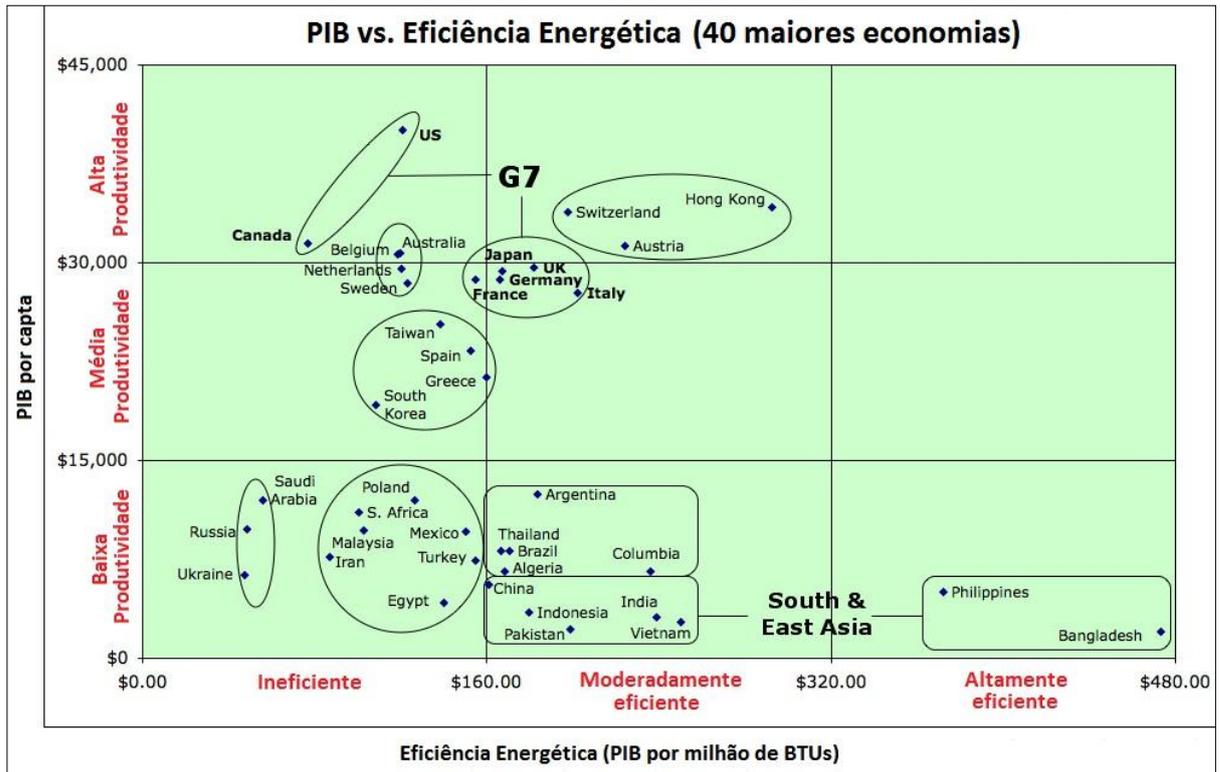
**Figura 2 – Projeções de consumo de energia para 2030 [1]**



**Figura 3 – Eficiência energética de continentes [2]**

Pela figura 3 pode-se perceber que, de todos os continentes comparados, o que mais aumenta a sua eficiência energética é o Oriente Médio – devido ao incremento acentuado do PIB desses países provenientes da indústria petrolífera. A Europa teve um desempenho ruim devido à desaceleração da economia nas décadas de 80 e 90, fazendo com que o PIB em geral não crescesse tão rapidamente quanto o consumo de energia.

América Latina (América do Sul e Central) vem melhorando sua eficiência energética lentamente, pois o PIB cresce lentamente, e o consumo também cresce em uma razão semelhante. Ásia e Oceania tem um desempenho semelhante à América Latina.



**Figura 4 - Gráfico de consumo de energia x PIB – por país [3]**

A figura 4 é o gráfico mais importante dos apresentados nessa etapa, pois apresenta uma compilação de dados relacionados a eficiência energética de países como um todo. Das nove divisões existentes no gráfico, somente sete estão ocupadas. As duas divisões livres são reservados apenas para países extremamente eficientes e produtivos, índices tão altos que não são possíveis com a tecnologia atual. Dentre os países mais produtivos, pode-se ver que alguns pertencem ao G7 e os que não pertencem ao G7 tem um alto Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Na parte de baixo da figura (os menos produtivos) estão aqueles chamados “países em desenvolvimento”, os quais tem um IDH consideravelmente menor. No caso do primeiro quadrante (baixa produtividade e ineficiência energética) o fator clima exerce um peso enorme. Rússia, Ucrânia e Polônia tem invernos rigorosos enquanto Arábia Saudita e Egito tem verões rigorosos. A energia gasta para amenizar os fatores climáticos não gera PIB, o que faz com que a eficiência energética desses países seja menor.

<b>Tarifas Médias por Classe de Consumo e Região (R\$/MWh)</b>						
CLASSE	CENTRO-OESTE	NORDESTE	NORTE	SUDESTE	SUL	BRASIL
Residencial	293,45	285,92	297,46	308,21	286,57	299,12
Industrial	208,63	210,39	240,68	241,25	212,71	226,57
Comercial	274,15	295,04	308,45	282,00	258,99	280,58
Rural	206,06	215,30	223,82	204,37	168,14	193,10
Poder Público	278,44	321,59	330,40	327,19	280,45	315,45
Iluminação Pública	158,47	177,08	173,80	168,01	147,08	166,06
Serviço Público	180,64	197,53	210,03	214,61	191,24	204,18
Consumo Próprio	297,37	284,91	318,41	296,59	192,77	256,42
Rural Aquicultor	240,99	197,96	242,38	193,16	76,79	189,01
Rural Irrigante	177,98	129,57	172,09	234,28	139,48	153,72
<b>TARIFA MÉDIA</b>	<b>254,76</b>	<b>254,76</b>	<b>279,55</b>	<b>276,00</b>	<b>237,08</b>	<b>262,98</b>

Fonte: Intranet. SAMP  
 Dados referentes ao período de dezembro de 2009  
 Data da consulta: 13/07/2009

**Figura 5 - Tarifas diferenciadas por classe de consumo [4]**

Pela figura 5 pode-se ver que tarifas variam conforme a região e tipo de consumo, e que esta variação é significativa. As tarifas mais baratas são rurais e iluminação pública, enquanto que as mais caras são poder público e residencial. Portanto quem terá mais proveitos de programas de eficientização energética são o poder público, e depois os setores residenciais e comerciais. A tabela 1 mostra uma distribuição do consumo de energia por setor, e a figura 6 complementa com valores.

**Tabela 1 – Consumo de energia por setor – uso final**

Destino	Comercial	Industrial	Residencial
Aquecimento	15 %	24 %	25 %
Refrigeração	22 %	4 %	31 %
Força-motriz	15 %	55 %	18 %
Iluminação	48 %	7 %	25 %
Outros	0 %	10 %	0 %
<b>TOTAL</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

Fonte: Iluminação econômica – Gilberto José Correa da Costa[45]

IDENTIFICAÇÃO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CONSUMO FINAL	171.949	172.186	178.160	182.114	191.197	195.909	202.898	215.494	226.393	221.334
CONSUMO FINAL NÃO-ENERGÉTICO	14.293	13.544	12.617	12.492	12.976	13.222	14.324	14.155	14.676	14.971
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	157.657	158.643	165.543	169.622	178.221	182.687	188.574	201.338	211.717	206.364
SETOR ENERGÉTICO	12.847	13.575	14.391	15.832	16.442	17.643	18.823	21.036	24.546	24.414
RESIDENCIAL	20.688	20.149	20.681	20.902	21.357	21.827	22.090	22.271	22.738	23.227
COMERCIAL	4.968	4.781	4.935	4.994	5.188	5.452	5.631	5.935	6.190	6.179
PÚBLICO	3.242	3.086	3.187	3.216	3.273	3.451	3.453	3.557	3.567	3.717
AGROPECUÁRIO	7.322	7.729	7.812	8.152	8.276	8.358	8.550	9.062	9.905	9.453
TRANSPORTES TOTAL	47.385	47.802	49.163	48.160	51.469	52.459	53.270	57.621	62.444	62.687
RODOVIÁRIO	42.766	42.946	44.459	44.329	47.334	48.073	49.067	52.892	57.370	57.683
FERROVIÁRIO	511	561	535	636	646	666	681	717	764	769
AÉREO	3.182	3.271	3.134	2.241	2.392	2.596	2.435	2.674	2.857	2.875
HIDROVIÁRIO	926	1.024	1.036	954	1.096	1.124	1.088	1.338	1.452	1.359
INDUSTRIAL TOTAL	61.204	61.521	65.373	68.367	72.217	73.496	76.757	81.856	82.327	76.686
CIMENTO	3.363	3.381	3.132	2.808	2.648	2.831	3.087	3.373	3.742	3.675
FERRO-GUSA E AÇO	15.285	14.767	15.729	16.701	17.945	17.459	16.985	18.241	18.229	13.636
FERRO-LIGAS	1.182	932	1.135	1.470	1.563	1.613	1.613	1.803	1.811	1.446
MINERAÇÃO E PELOTIZAÇÃO	2.312	2.268	2.356	2.495	2.642	2.905	3.013	3.342	3.349	2.407
NÃO-FERROSOS E OUTROS METAL	4.365	4.001	4.515	5.014	5.298	5.430	5.694	5.982	5.975	5.601
QUÍMICA	6.421	6.357	6.595	6.547	7.115	7.168	7.364	7.657	7.209	6.808
ALIMENTOS E BEBIDAS	12.514	14.418	15.839	16.659	17.599	17.926	20.122	21.262	20.694	21.658
TÊXTIL	1.124	1.068	1.117	1.080	1.186	1.202	1.213	1.275	1.208	1.157
PAPEL E CELULOSE	6.206	6.161	6.586	7.120	7.299	7.684	8.016	8.554	8.957	9.511
CERÂMICA	3.068	2.989	3.057	3.126	3.215	3.412	3.533	3.841	4.157	4.107
OUTROS	5.363	5.179	5.311	5.346	5.707	5.866	6.118	6.525	6.997	6.680
CONSUMO NÃO-IDENTIFICADO	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0

**Figura 6 - Trecho do balanço energético nacional de 2010 [5]**

A unidade do consumo final é em  $10^3$  tep (tonelada equivalente de petróleo).

Para analisar corretamente os dados apresentados na figura 6, deve-se lembrar que 2009 é um ano atípico em relação aos anteriores. A indústria ainda sofre uma retração devido a crise mundial, mas esse cenário tende a mudar, e espera-se que a indústria volte a crescer mais em 2010. Ainda pela figura 6, nota-se que o maior crescimento do consumo de energia elétrica em 2009 é o residencial, com 5,3% de aumento. Os setores primário e secundário tiveram desempenho negativo, enquanto que o público e terciário continuaram crescendo.

Para concluir, destaca-se que os maiores consumidores de energia elétrica, em ordem decrescente são: industrial (50 %), residencial (27%) e comercial (18%). Esses dados são importantes para entender os impactos de programas de eficiência energética.

### **1.3 Eficiência Energética**

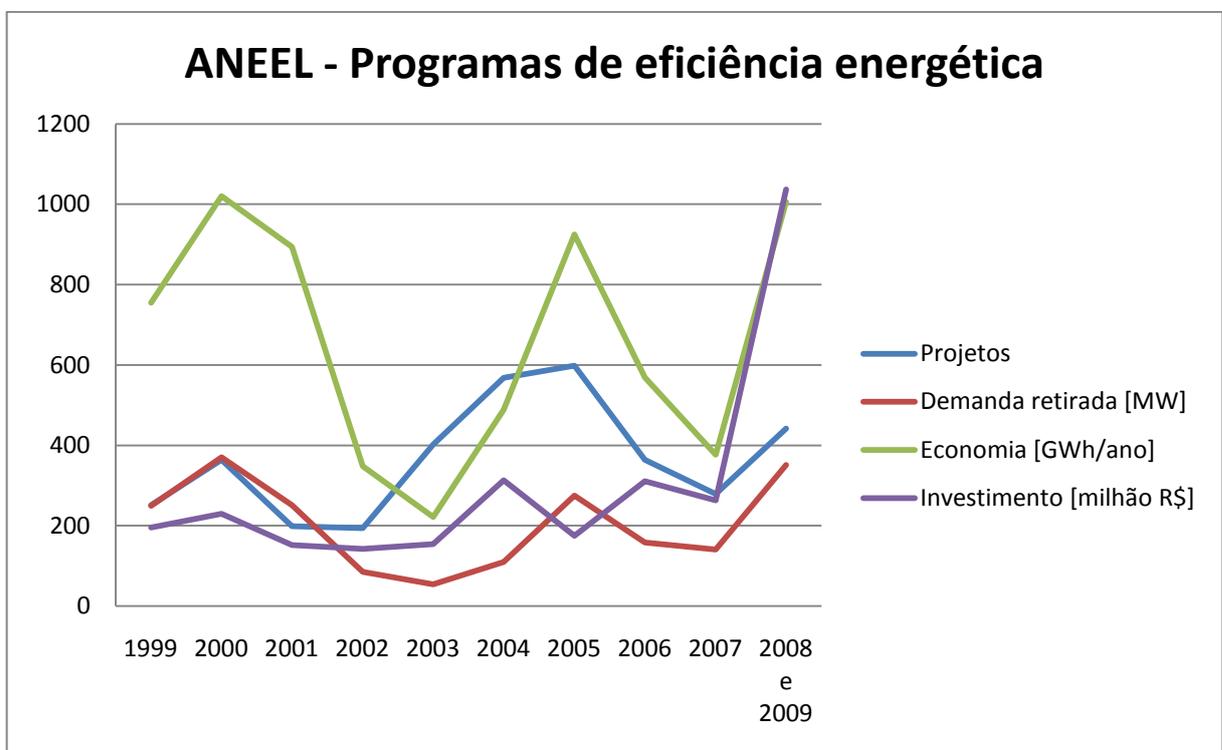
A definição de eficiência energética pode ser dada por atividade técnico-econômica que visa proporcionar um consumo otimizado de água e energia. A eficiência energética visa minimizar o contingenciamento do suprimento de água e energia; assim como diminuir os custos operacionais destes insumos. Neste trabalho, a definição de eficiência energética irá contemplar apenas o consumo de energia elétrica.

Como foi visto no tópico anterior, o consumo de energia elétrica no Brasil cresce, em média, 4,4% ao ano (média mundial 4,1%) [1] [5], enquanto que a oferta de energia elétrica cresce abaixo destes valores. Quanto ao déficit crescente da geração de energia, pode-se dizer que existem três opções: aumentar a geração de energia, reduzir o consumo de energia (através de programas de eficiência energética), ou o colapso do sistema elétrico.

O governo brasileiro e as concessionárias trabalham constantemente visando o aumento da geração de energia, dentro dos limites impostos pelos recursos (naturais e financeiros). Quanto à redução do consumo de energia, ou a redução do consumo devido a

programas de redução de desperdícios, pode-se dizer que há uma consciência de sua importância, mas ainda não há uma adesão geral do governo e da população.

Essas afirmações estão baseadas na análise de programas (oficiais) de eficiência energética no Brasil. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) disponibiliza todo ano um resumo do cenário energético em seu sítio de internet [4]. A parte relacionada aos programas de eficiência energética está na figura 7.



**Figura 7 – Programas de eficiência energética no Brasil [4]**

A tendência vista na figura 7 é que o governo brasileiro não possui uma regularidade nos esforços relacionados à eficiência energética. Não é possível identificar uma tendência crescente de projetos ou investimentos nessa área, exceto pelos últimos dois anos. Uma política que poderia mudar esse ponto de vista seria a implantação de uma tarifa (R\$/kWh) que não fosse linear, que aumentasse conforme o valor consumido aumenta, ou que mudasse

o valor dependendo do consumo total naquele momento. Para que isso seja implementado, necessita-se de uma reforma nas redes e nos medidores de todo o país (os chamados medidores inteligentes).

Estudos realizados na Europa [6] apontam um potencial de economia energética de 20 % em todos os setores da economia – o que representaria €60 Bilhões. Estudos semelhantes foram realizados nos EUA [7], resultando no mesmo índice de 20 %, ou o equivalente a 64 milhões de barris de óleo por dia. Esse índice de potencial de economia varia conforme a área de aplicação, como por exemplo 50 % em iluminação.

#### **1.4 Empresas de serviços de conservação de energia**

As empresas especializadas em programas de eficiência energética – ESCOs (empresas de serviços de conservação de energia) são a chave para entender o assunto aqui desenvolvido. Essas empresas não estão restritas a apenas reduzir o consumo de energia elétrica, mas sim de energia como um todo. Sendo assim, elas detêm uma grande quantidade de tecnologias e métodos relativos a esse assunto (no jargão de engenharia, o “know-how”). A associação dessas empresas no Brasil está representada pela Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO) [10].

A base do mercado das ESCOs hoje em dia, é o chamado “contrato de performance”; firmado entre a empresa que requer o serviço e a ESCO que fornece o serviço. As principais características [11] desse contrato são: ganhos garantidos para o cliente (a ESCO usa uma margem de segurança por garantia), ganhos divididos com o cliente, e o empréstimo do capital usado na reestruturação pode ser por conta da empresa - ou seja, não é necessário um investimento inicial.

A economia projetada depende das condições presentes no momento da elaboração do projeto: volume de produção, tecnologia empregada e funcionamento ajustado do maquinário para atender o volume de produção existente.

É necessário que o capital usado para realizar o programa deve ser decorrente do próprio programa de economia – por meio de melhorias da instalação elétrica e iluminação. Nos EUA, essa parceria entre o governo e ESCOs está crescendo; e essa é uma das razões a qual o mercado das ESCOs cresce em torno de 22% ao ano. Durante o Congresso Brasileiro de Eficiência Energética [12] [13] realizado em Junho de 2010, foi revelado que uma das metas do governo federal é alcançar a economia de 106TWh até 2030. Caso essas metas sejam oficializadas, o mercado das ESCOs no Brasil irá receber um incentivo muito grande.

## **1.5 Órgãos regulamentadores**

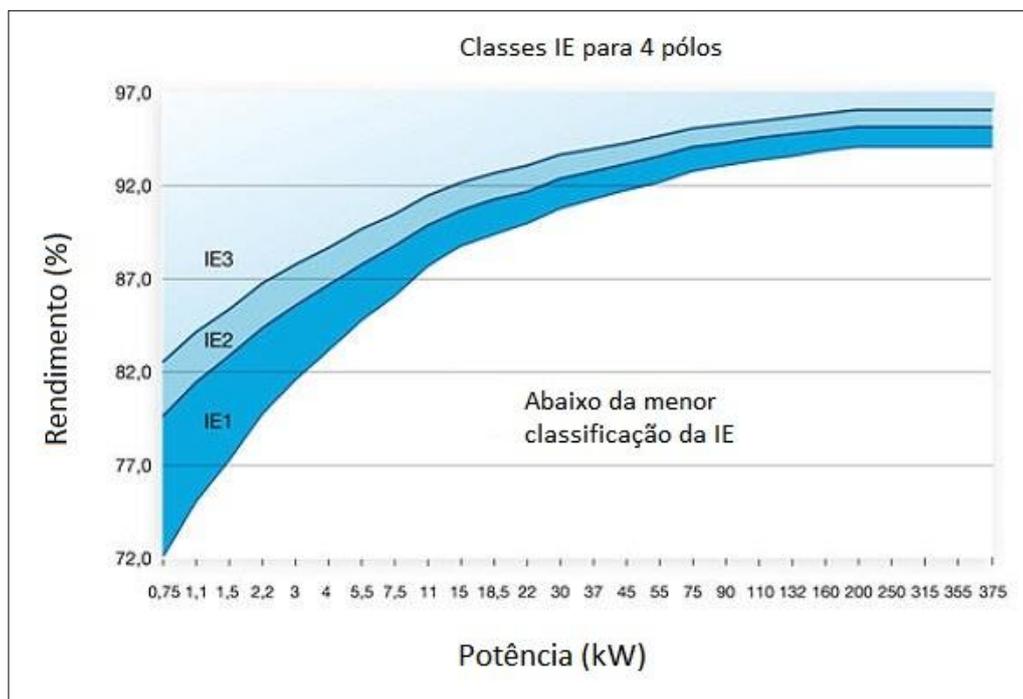
No Brasil, a ANEEL é o órgão regulamentador que trata de fiscalizar e legislar sobre programas de eficiência energética. Da legislação relacionada ao tema, destaca-se a lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, que obriga as concessionárias distribuidoras a aplicar 1% de sua receita operacional líquida, tanto para pesquisa e desenvolvimento, quanto para programas de eficiência energética – chamado de Programa de Eficiência Energética das Empresas de Distribuição.

Os projetos do Programa de Eficiência Energética visam demonstrar à sociedade a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício de energia elétrica e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia.

Na Europa, a Comissão Europeia de Energia (European Commission - Energy) trata de legislar sobre o tema, elaborando novos documentos sobre metas, planos de ação e outros assuntos relacionados. Uma dessas medidas foi lançar em 2008 a IEC60034-2-1 [15] que

estabelece novos padrões para medição do rendimento de motores elétricos e novas categorias de eficiência para os mesmos.

Na figura 8 pode-se ver que conforme a potência do motor aumenta, maior deve ser o rendimento para ser enquadrado na categoria; conseqüentemente, menores serão suas perdas.



**Figura 8 – Classificação de motores pela sua eficiência**

Este tipo de carga tem muita importância em todos os setores da sociedade moderna (bombas, elevadores, outros) e do ponto de vista de energia consumida, também tem grande peso: por exemplo, na indústria da Inglaterra os motores consomem 25% de toda a energia produzida. Esses novos padrões (que começam a valer em 2011 e 2015) pretendem elevar a eficiência de todos os motores fabricados, de modo a freiar o aumento da carga. Estima-se que em 2020, com os novos padrões de eficiência implementados, a economia na união européia possa chegar a 135 TWh [16].

**Tabela 2 – Valores de rendimento para motores regulamentados pela IEC**

Pot.Saída (e nº pólos)	Normas de 1996		Normas de 2007	
	Rendimento (%)	Perdas (kW)	Rendimento (%)	Perdas (kW)
7,5 kW (2)	88,4	0,87	87,9	0,91
11 kW (4)	90,9	1,00	90,3	1,07
160 kW (4)	96	6,4	95,4	7,36

Fonte: periódico Eureka Magazine, Maio de 2010 [16]

Na tabela 2, pode-se observar que as perdas dos motores são menores quando medidas com o novo padrão regulatório da IEC60034-2-1. Isso se deve ao fato de que as metodologias e condições de ensaios também mudam na nova norma. Por exemplo, as perdas nos enrolamentos do estator e do rotor, na primeira coluna, são determinados a 95° C enquanto que no novo método devem ser determinados a 25° C, mais a variação de temperatura medido.

## 1.6 Selos certificadores

Outra ferramenta muito importante relacionada à eficiência energética (em um sentido amplo que pode abranger equipamentos não-elétricos) são os selos certificadores. Existem diversos selos que tem como objetivo certificar os equipamentos (ou empreendimentos – como edificações) que tem um valor elevado de eficiência energética. Neste trabalho estão alguns deles, considerados de maior importância ou popularidade entre todos.

### 1.6.1 Energy Star



**Figura 9 – Logotipo do selo Energy Star**

Energy Star [17] é um programa criado para certificar produtos com alto índice de eficiência energética. É um órgão criado nos Estados Unidos, pela agência de proteção ambiental; mas já foi adotado também em países como Austrália, Canadá, Japão, União Européia e outros. Os produtos com o selo Energy Star – que incluem edificações, periféricos e fontes de computadores, refrigeradores, máquinas lavar louça e outros – devem consumir entre 20 e 30 % menos do que os padrões nacionais. A agência de proteção ambiental dos EUA diz que este programa ajudou a reduzir os gastos com energia em 2006 em 14 bilhões de dólares. Algumas medidas adotadas foram semáforos com lâmpadas LED, uso de lâmpadas fluorescentes com alta eficiência, programas de gestão da energia de equipamentos de escritório, e certificação de dispositivos com baixa potência de “standby”.

Além de eletrodomésticos, a Energy Star também possui uma categoria específica para edificações. Para que uma determinada edificação receba o selo de eficiência energética, deve cumprir uma série de metas que formam um score final, que deve ser superior a 75% para que o produto receba o selo. A tabela 3 mostra as metas de gasto médio de energia e de média de energia elétrica gasta por energia total; com seus respectivos valores para que seja aprovado neste item.

**Tabela 3 – Metas para o selo Energy Star de edificações**

Ocupação	Média de gasto de energia por área [Kbtu/sqft]	Média de energia elétrica gasta por energia total [%]
Escola secundária / universidade	280	63
Loja de conveniência	753	90
Restaurante / cafeteria	612	53
Loja de Fast food	1306	64
Shopping center	271	71
Biblioteca pública	246	59

Fonte: Sítio de internet da organização Energy Star [17]

### 1.6.2 Tjänstemännens Centralorganisation



**Figura 10 – Logotipo do selo TCO**

Tjänstemännens Centralorganisation (TCO) [18] é um selo de qualificação usado na Europa, criado na Suécia em 1992. Ele difere do Energy Star por tratar apenas de equipamentos de escritório; e ser mais aprofundado nas diretrizes. Estas diretrizes mudam ao longo dos anos, e o padrão vai se atualizando (TCO'92, TCO'95 - o mais atual é de 2007).

O selo TCO trata não apenas do aspecto de eficiência energética (que foi ficando mais rigoroso ao longo dos anos) mas também de aspectos ergonômicos, emissões de gases e outros itens relacionados a ecologia. É usado principalmente em monitores de computador.

### 1.6.3 CONPET e PROCEL



**Figura 11 – Logotipos do selo CONPET e PROCEL**

No Brasil os selos mais importantes (ou mais conhecidos) relacionados à eficiência energética são do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica [19] [20] – ou simplesmente selo PROCEL; e o selo do programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e do Gás Natural – ou simplesmente selo CONPET [21]. O selo CONPET, em vigor desde 2005, é destinado aos equipamentos domésticos de consumo de gás, que alcançaram os menores índices de consumo de combustível; enquanto que o selo PROCEL, em vigor desde 1993, é destinado aos equipamentos elétricos domésticos. A Eletrobrás conta com a ajuda do INMETRO [22], através do Programa Brasileiro de Etiquetagem – cujo principal produto é a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), para conceder o selo PROCEL. Normalmente, os produtos contemplados são caracterizados pela faixa “A” da ENCE; a qual é composta por aproximadamente 34 categorias de produtos, desde aquecedores de água a gás até ventiladores de teto.

Para ser contemplado com o selo PROCEL, o produto deve ser submetido a ensaios específicos em laboratório idôneo, indicado pelo Procel. Os parâmetros a serem avaliados para cada equipamento constam nos Critérios Específicos, determinados conforme a categoria

que ele pertence. Como diretriz orientativa, o SELO PROCEL deve ser concedido, após um período de implantação ou revisão de índices, ao grupo máximo de 25 % de produtos mais eficientes em cada categoria. Quanto ao impacto destes programas, pode ser visto em [19]: os refrigerados comuns de uma porta, que representam 70 % do mercado de refrigeradores do país, consomem cerca de 30 % menos energia elétrica do que os fabricados há seis anos. Entre os condicionadores de ar, os modelos atuais com potência entre 9.500 e 10.500 BTU/h têm uma eficiência 14% maior. Motores elétricos com potência de 1 CV (750 W) têm uma eficiência 12% maior.

Assim como no selo Energy Star, o selo PROCEL também tem uma linha voltada à edificações [23]. O selo PROCEL Edifica foi lançado em 2009 e tem como alvo as edificações que são construídas segundo padrões de eficiência energética. públicas ou comerciais. Essas edificações certificadas podem ter uma economia de 30 a 40 % na conta de energia, economia de 50 % no consumo de água, redução de 35 % nas emissões de CO<sub>2</sub> e até 90 % no descarte de resíduos; enquanto que o seu custo de construção fica entre 5 a 10 % maior [24]. Apesar de ter essa grande vantagem econômica em relação as edificações comuns, ainda existe uma baixa adesão de parte das construtoras (em setembro de 2010, apenas 10 edifícios em todo o Brasil no momento em que esses dados foram coletados). Para incentivar o aumento do número de edificações com a etiqueta PROCEL edifica, o governo lançou através do BNDES, uma linha de crédito [25] para hotéis em construção (ou que pretendem reformar) que exigem que o empreendimento tenha a classificação “A” do selo. Além disso, o governo estuda a possibilidade de tornar obrigatória a etiquetagem energética dos edifícios assim como acontece nos eletrodomésticos.

## 2. DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES

### 2.1 Introdução e Conceitos

Este método trata da escolha econômica de condutores com bases em perdas joule. O método de referência para determinar a seção econômica de um condutor consta na publicação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Norma Brasileira (NBR) (International Electrotechnical Commission) IEC 60287-3-2 (versão Julho de 2009) [26]; que por sua vez está baseada na norma IEC 60287-3-2:1995, Electric cables – Calculation of the current rating – Part 3-2:Sections on operating conditions – Economic optimization of power cable size [27].

Para poder dimensionar corretamente a seção de um condutor, deve-se seguir as orientações da NBR5410:2004. Existem seis critérios para dimensionamento da seção: seção mínima, capacidade de condução de corrente, queda de tensão, proteção contra sobrecargas, proteção contra curto-circuitos e proteção contra contatos indiretos.

Cada um destes seis itens pode fornecer um valor da seção diferente; e quando terminados os cálculos, o maior valor destes deve ser adotado. Tendo em vista que o objetivo é calcular seções de condutores maiores para reduzir as perdas resistivas, geralmente pode-se desprezar estes valores mínimos; pois os valores calculados irão estar acima dos mínimos da norma. Assim, assume-se que tenha sido calculado o valor mínimo da seção do condutor através da NBR, pode-se então passar ao método da seção econômica do condutor. O enfoque será a aplicação do método (e suas consequências), e não a dedução de suas equações.

Esse método, segundo a NBR IEC 60287-3-2, é recomendado apenas para cabos que operam em tensões abaixo de 6kV (para isolamento PVC), 63,5kV (para isolamento EPR) ou 127kV (para isolamento PE). Outras vantagens de dimensionar o condutor a fim de obter o

melhor aproveitamento econômico são: o aumento de sua vida útil (devido ao fato do cabo trabalhar com temperaturas menores) e melhor comportamento do condutor em relação às correntes de sobre carga e curto-circuito. É importante destacar o impacto ambiental da escolha da seção do condutor. Como mostrado em [28], o aumento da seção dos condutores contribui para a redução de CO<sub>2</sub> na atmosfera – devido à diminuição da energia extra necessária para compensar as perdas Joule na condução de corrente elétrica.

Alguns exemplos de aplicações são: alimentadores de quadros de distribuição, quadros de luz, alimentação de motores elétricos, torres de resfriamento e ar condicionado.

## 2.2 Modelos matemáticos

### 2.2.1 Resistência e resistividade

Para poder começar uma análise que irá levar ao custo de todo o sistema, deve-se partir do cálculo da resistência de um determinado material. A relação usada neste trabalho que descreve o comportamento da resistência só pode ser usada para condutores isotrópicos homogêneos de seção transversal uniforme com a diferença de potencial aplicada nas suas extremidades. Esta relação é dada pela equação:

$$R = \rho \cdot \left(\frac{L}{A}\right) \quad (1)$$

onde

$\rho$  = resistividade = valor intrínseco do material usado [ $\Omega \cdot m$ ]

L = comprimento do condutor [m]

A = área da seção transversal [ $m^2$ ]

R = resistência [ $\Omega$ ]

Os valores de resistividade dos materiais mais usuais na confecção de condutores são fornecidos na tabela 4 [26] [29]; assim como uma série de valores de referência [28] para a resistência de condutores (flexíveis e multipolares) pode ser conferida na tabela 5:

**Tabela 4 – Valores típicos de resistividade por material**

Material	Resistividade $\rho$ [ $\Omega.m$ ]*	Resistividade $\rho$ [ $\Omega.m$ **	Coef. Temp. $\alpha$ [ $K^{-1}$ ]
Cobre	$1,69.10^{-8}$	$1,835.10^{-8}$	$6,8.10^{-3}$
Alumínio	$2,75.10^{-8}$	$3,030.10^{-8}$	$4,4.10^{-3}$

\*[29] Halliday, Fundamentos de física volume 3

\*\* NBR IEC 60287-3-2

**Tabela 5 – Resistência em corrente contínua para condutores classe 5**

Seção Nominal [ $mm^2$ ]	Resistência máxima do condutor a 20°C [ $\Omega.km$ ]
1	19,5
1,5	13,3
2,5	7,98
4	4,95
6	3,3
10	1,91
16	1,21
25	0,78
35	0,554
50	0,386
70	0,272
95	0,206
120	0,161
150	0,129
185	0,106
240	0,08

**Tabela 5 – Resistência em corrente contínua para condutores classe 5**

Seção Nominal [mm <sup>2</sup> ]	Resistência máxima do condutor a 20°C [Ω.km]
300	0,064
400	0,0486
500	0,0384

Fonte: Dimensionamento econômico e ambiental de condutores elétricos, Hilton Moreno, 2010

Além desse valor “base” de resistência, a resistência de um condutor cresce, com uma razão aproximadamente linear, em razão de sua temperatura. Esta razão é chamada de coeficiente de temperatura da resistividade  $\alpha$ , unidade K<sup>-1</sup>. Portanto, para usar o valor correto de resistência, deve-se calcular o valor em relação à temperatura de operação do condutor.

$$R(S) = \frac{\rho_{20} \cdot B \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_m - 20)]}{S} \cdot 10^6 \quad (2)$$

$$B = (1 + y_p + y_s) \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (3)$$

$$\theta_m = \left[ \frac{\theta - \theta_a}{3} \right] + \theta_a \quad (4)$$

onde

R(S) = resistência do condutor em relação a seção S [Ω]

$\rho_{20}$  = resistividade do material a 20°C [Ω.m]

B = quantidade auxiliar definida por (3)

$\alpha_{20}$  = coeficiente de temperatura para a resistência do condutor a 20°C [K<sup>-1</sup>]

S = seção do condutor a ser analisado [mm<sup>2</sup>]

$y_p, y_s$  = fatores de proximidade, conforme IEC 60287-1-1

$\lambda_1, \lambda_2$  = fatores de perda na cobertura e armação, conforme IEC 60287-1-1

$\theta_m$  = temperatura média de operação do condutor [°C]

$\theta$  = temperatura de operação nominal máxima do condutor [°C]

$\theta_a$  = temperatura média do ambiente [°C]

Por questões de simplificação, como recomendado pela norma, será utilizado uma versão “simples” (4) do cálculo da temperatura média de operação ( $\theta_m$ ). Para tal, despreza-se os valores de perda na cobertura e armação do condutor; despreza-se o fator de proximidade e o fator de efeito pelicular (na equação 3 correspondem a  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $y_p$  e  $y_s$ ). Portanto o valor de B a ser utilizado nos estudos de caso será constante e igual a um.

Além do comprimento, temperatura e material utilizado, outro fator influente nas propriedades do condutor é a geometria da seção transversal do condutor. Existem condutores de seção inteira (um fio apenas), “cabo flexível” (conjunto de filamentos) e até mesmo seção transversal retangular (presente em motores elétricos).

## 2.2.2 Perdas na frequência fundamental

Com o valor calculado de resistência, pode-se determinar a energia dissipada pelo efeito Joule (também chamado de perdas térmicas) na frequência fundamental de um condutor. Essas perdas não constituem nenhuma potência útil no sistema, e devem ser minimizadas para maximizar a eficiência do sistema. As perdas na frequência fundamental no condutor são determinadas pela equação:

$$E_{diss} = R \cdot I^2 \cdot \Delta t \quad (5)$$

onde

$E_{diss}$  = energia dissipada no condutor [W.h]

R = resistência do condutor [ $\Omega$ ]

I = corrente de operação [A]

$\Delta t$  = tempo decorrido [h]

Substituindo (1) em (5) obtém-se:

$$E_{diss} = \rho \cdot \left(\frac{L}{A}\right) \cdot I^2 \cdot \Delta t \quad (6)$$

Portanto, de (6) observa-se que as perdas resistivas do condutor dependem do quadrado da corrente no condutor aplicada em seus terminais, do seu comprimento, da resistividade do material, da sua seção e do tempo de operação. Dentre todos esses fatores, o único que pode ser escolhido para determinar a seleção do cabo (do ponto de vista do engenheiro como um consumidor) é a sua seção.

### 2.2.3 Perdas na presença correntes harmônicas

As correntes harmônicas que circulam nos condutores podem vir a ter um forte impacto nas perdas Joule, para determinadas frequências. O método para determinar a energia dissipada no condutor pelas correntes harmônicas é muito semelhante ao da fundamental, exceto que o valor equivalente de resistência usado é outro. Está expresso na equação (7):

$$E_{harmônicas} = R_n \cdot I_n^2 \cdot \Delta t \quad (7)$$

onde

$E_{harmônicas}$  = energia dissipada no condutor pelas correntes harmônicas [W.h]

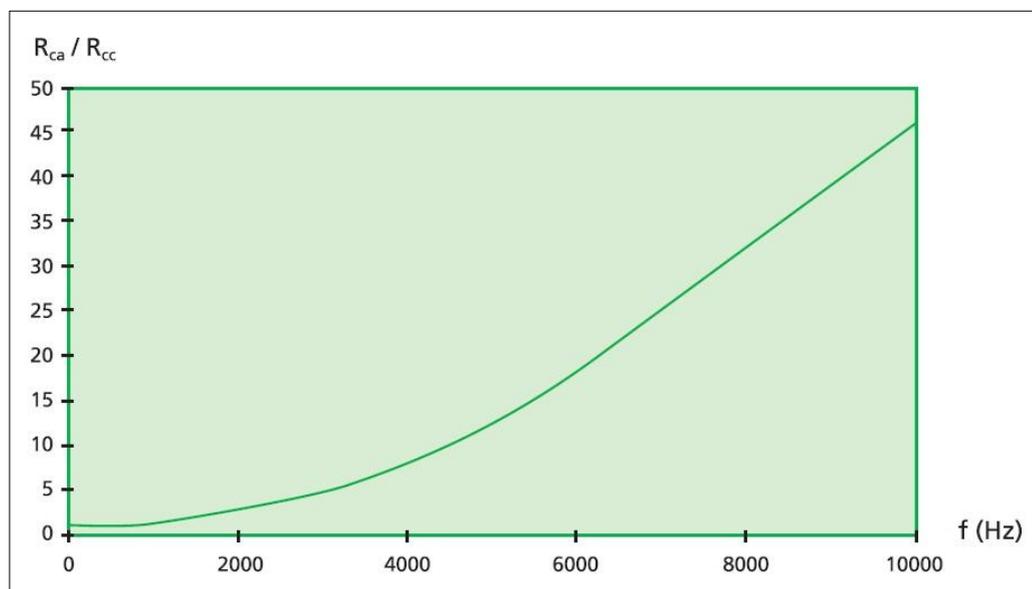
$R_n$  = resistência do condutor para harmônica de ordem n [ $\Omega$ ]

$I_n$  = corrente harmônica de ordem n [A]

$\Delta t$  = tempo decorrido [horas]

A resistência equivalente do condutor, quando submetida a uma corrente alternada com presença de harmônicas, difere do valor da resistência quando submetida a uma corrente contínua. Esse fato se deve ao fenômeno conhecido como “efeito pelicular” ou “skin effect” [28]. O efeito pelicular [29] é a tendência de uma corrente alternada de distribuir-se dentro de um condutor de modo que a densidade de corrente na superfície é maior do que no seu núcleo; fazendo com que haja um aumento da resistência aparente de um condutor elétrico.

Um exemplo de um sinal de corrente alternada com componentes de alta frequência é uma descarga atmosférica. Deste modo, a resistência equivalente “vista” por esta descarga é bem maior do que a equivalente de um outro sinal de corrente contínua. O efeito pelicular é mais notável em sistemas de rádio-frequência, principalmente antenas e linhas de transmissão. A figura 12 [28] mostra a proporção do incremento da resistência equivalente de um condutor quando submetido a altas frequências.



**Figura 12 – Relação entre resistência equivalente e frequência**

Conforme o gráfico mostrado na figura 12, até aproximadamente 1000 Hz não há incremento da resistência equivalente, mas a partir de 2000 Hz aparece uma relação de incremento linear conforme a frequência aumenta. Uma opção para diminuir o efeito pelicular é utilizar um fio flexível ao invés de um fio sólido; desta maneira, a superfície efetiva aumenta em relação à seção do condutor. A outra opção é aumentar a seção transversal do condutor, assim reduzindo a resistência equivalente de corrente contínua, e tendo um efeito pelicular menos pronunciado.

O caso de estudo que foi verificado relativo às perdas com e sem considerar o efeito das harmônicas é descrito em [30]. Neste caso, que pode ser classificado como um caso “comum” na indústria, as harmônicas foram responsáveis por um aumento da temperatura acima do nominal, reduzindo em até 25% a vida útil do cabo. Essa substituição prematura dos cabos, e as perdas Joules seriam então responsáveis por um aumento de 8% nas despesas do sistema. Nesse caso estudado, a solução encontrada foi aumentar a seção do condutor em uma categoria; que resultou na redução de 14% (em relação ao custo base) as despesas do sistema. Portanto, a diferença de custos entre aumentar e não aumentar em uma categoria a seção do condutor, é de 22% em relação ao custo base.

Como as frequências usadas nos sistemas a serem analisados neste trabalho (60 Hz) são muito baixas quando comparadas a aquelas que aumentam, efetivamente, a resistência equivalente do condutor; os cálculos de resistência equivalente dos condutores a serem dimensionados por este trabalho irão desprezar os efeitos de harmônicas na corrente.

### **2.3 Método para o dimensionamento econômico de condutores**

O método descrito na publicação NBR IEC 60287 baseia-se em aplicar uma série de dados e parâmetros conhecidos do sistema a ser estudado em equações, para obter-se o valor

ideal da seção do condutor. Depois de obter esse valor, deve-se fazer uma análise econômica dos resultados.

Para uma análise econômica correta, deve-se usar valores econômicos comparáveis – que são valores que se referem ao mesmo ponto no tempo. A data da compra e da instalação do sistema é definida como data “presente”. Os custos “futuros” das perdas de energia são convertidos ao seu equivalente valor presente; isso é feito pelo processo de amortização, cuja taxa está ligada ao custo do dinheiro. As constantes usadas para determinar esse custo futuro são: aumento da carga, aumento do custo da energia (custo do kWh) e taxa de desconto anual pela vida econômica do cabo. O custo total (já em valor presente da data da compra) de um sistema de condutor(es) é:

$$CT = CI + CJ \quad (8)$$

onde

CT = custo total de implantação e operação [cu]

CI = custo inicial de implantação [cu]

CJ = custo equivalente na data da compra, das perdas Joule [cu]

[cu] = unidade monetária arbitrária

As figuras 13 e 14 apresentam gráficos com os custos iniciais e as curvas mais comuns de custos totais. Os custos utilizados neste trabalho são fruto de pesquisa em normas [26] e catálogos [28] [31] [32] de mercado.

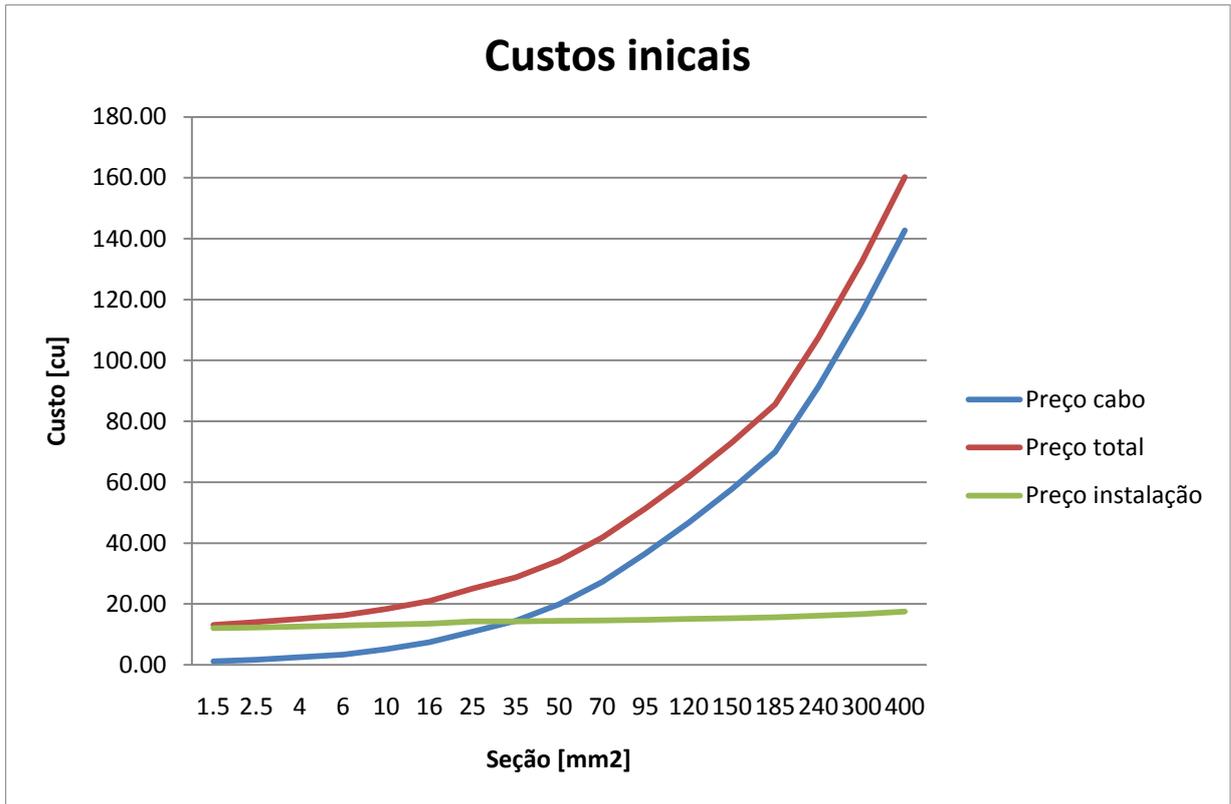


Figura 13 – Custos iniciais relacionados a cabos

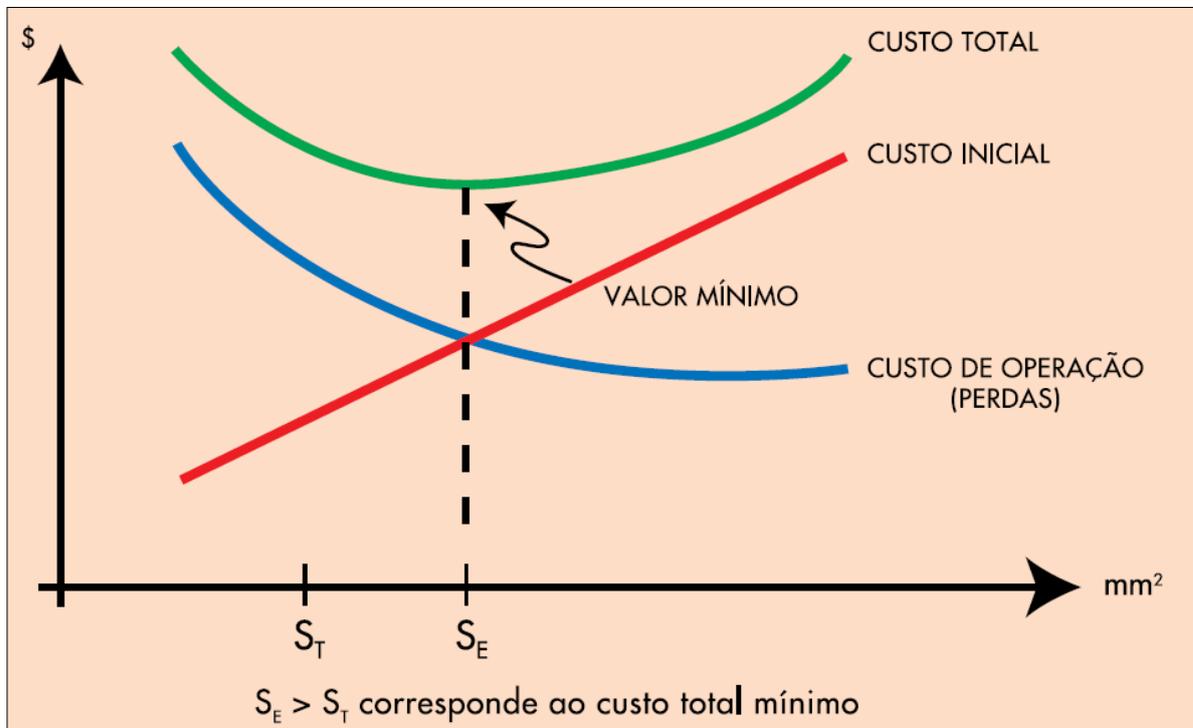


Figura 14 – Seção econômica de um condutor

De acordo com a NBR IEC 60287, a seção econômica do condutor é obtida quando a soma dos custos futuros das perdas de energia e os custos iniciais da compra e instalação forem minimizados. Este custo inicial pode ser apresentado da seguinte forma:

$$CI = l.(A.S + C) \quad (9)$$

$$A = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{P_2 - P_1}{S_2 - S_1} \right) \quad (10)$$

onde

CI = custo inicial de implantação [cu]

l = comprimento do condutor [m]

S = seção do condutor [mm<sup>2</sup>]

C = componente constante – preço da instalação [cu.m]

A = custo médio da seção [cu/mm<sup>2</sup>.m]

n = número total de custos de seções calculadas

P1 = preço do cabo de seção índice (x-1) [cu]

P2 = preço do cabo de seção índice (x) [cu]

S1 = seção do condutor índice (x-1) [mm<sup>2</sup>]

S2 = seção do condutor índice (x) [mm<sup>2</sup>]

De forma semelhante, o valor presente do custo de energia durante N anos de operação, capitalizado na data da compra é:

$$CJ = I_{max}^2 \cdot R \cdot l \cdot F \quad (11)$$

$$F = \frac{N_p \cdot N_c \cdot (T \cdot P + D) \cdot Q}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)} \quad (12)$$

$$Q = \frac{1 - r^n}{1 - r} \quad (13)$$

$$r = \frac{\left(1 + \frac{a}{100}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{b}{100}\right)}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)} \quad (14)$$

onde

F = quantidade auxiliar definida por (12)

$N_p$  = número de condutores por fase no circuito

$N_c$  = número de circuitos com o mesmo tipo e valor de carga

T = tempo de operação com perda Joule máxima [h/ano]

P = custo de um watt-hora para a carga definida [cu/W.h]

D = variação anual da demanda [cu/W.ano]

Q = quantidade auxiliar definida por (13)

r = quantidade auxiliar definida por (14)

N = período coberto pelo cálculo financeiro, ou “vida econômica” [anos]

a = aumento anual da carga [%]

b = aumento anual do custo de energia [%]

i = taxa de capitalização sem incluir efeitos inflacionários [%]

Substituindo (9) e (11) em (8) obtém-se (15), que é a equação relativa ao custo total do sistema a ser estudado. E finalmente, (16) é a equação que fornece a seção econômica do condutor relativo à aqueles parâmetros fornecidos:

$$CT = l(A.S + C + I_{max}^2 . R . F) \quad (15)$$

$$S_{ec} = 1000 . \sqrt{\frac{I_{max}^2 . F . \rho_{20} . B [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{A}} \quad (16)$$

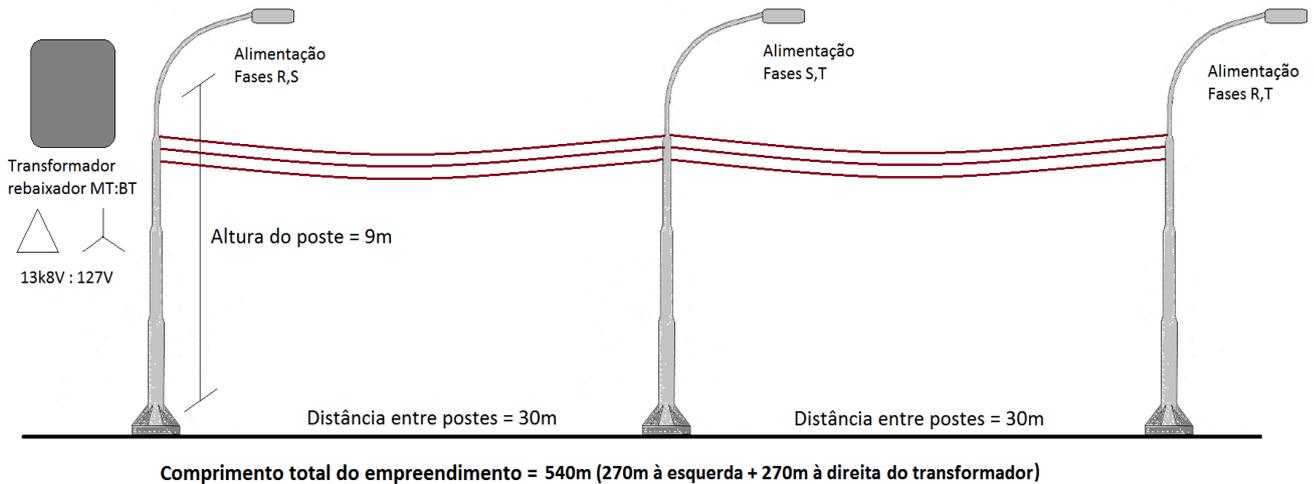
Como pode-se ver, a seção econômica do condutor independe do comprimento. Porém o custo das perdas é diretamente dependente do comprimento. Para poder aplicar este método e obter os resultados mais exatos possíveis, necessita-se partir dos seguintes pressupostos:

- a) Os parâmetros financeiros assumidos permanem inalterados durante a vida econômica do cabo.
- b) A inflação é desconsiderada, pois irá afetar tanto o custo do dinheiro quanto o custo de energia.
- c) A temperatura do condutor permanece constante durante todo o tempo de seu funcionamento.
- d) Desprezam-se as perdas dielétricas para cabos de BT ( $\leq 1$  kV) e MT ( $\leq 36,2$  kV) como já visto em 2.2.1

#### **2.4 Estudo de caso – Iluminação pública**

Este caso é livremente baseado em um trecho de iluminação pública presente em um trecho de avenida asfaltada, localizado à beira do Guaíba, em Porto Alegre. Tem como objetivo apenas a aplicação do método de dimensionamento econômico de condutores descrito anteriormente, para a avaliação de seus resultados posteriormente. Foi arbitrado que tem-se um trecho de iluminação pública de uma avenida de 300m de extensão, alimentado por um transformador de distribuição (de média - 13k8V para baixa tensão - 127V). Deve-se implementar um ponto de luz (poste com altura de 9 m) a cada 30 metros. As lâmpadas devem ser de vapor de sódio - potência de 250 W, fluxo luminoso 33200 lm, IRC 20-39, vida útil 32.000 horas, utilização de 12 horas diárias. O reator destas lâmpadas opera em 220 V (portanto requer uma alimentação bifásica) e cada fase tem corrente média (durante todo o

comprimento da fase) de 6 A e corrente máxima de 12 A. O FP considerado é de 0,95 e a vida econômica é de 7 anos (aproximadamente a vida útil das lâmpadas). A figura 15 mostra os três primeiros postes do lado direito do transformador, e a figura 16 mostra o diagrama unifilar simplificado destas três primeiras lâmpadas.



**Figura 15 – Ilustração do sistema de iluminação pública**

Considerando um poste a cada 30 metros, tem-se ao total 19 pontos em cada transformador (9 à direita do transformador, 9 à esquerda do transformador e um ponto no próprio poste do transformador). Destes 19 postes, tem-se 6 alimentados com as fases R-S; 6 alimentados com as fases S-T e 6 alimentados com as fases R-T. Somando os condutores que sobem no poste e alimentam a lâmpada, cada fase tem adicionais 2 m de fio condutor. Portanto cada fase terá comprimento final de 282 m. O material escolhido para o condutor foi o cobre (cabo isolamento PVC encordoamento classe 2, tensão de ruptura 750V, temperatura máxima contínua de operação 70°C).

**Tabela 6 – Dados iniciais calculados para o caso de iluminação pública**

Descrição da variável	Nome	valor	unidade
Aumento anual da carga	a	1	%
Aumento anual do custo de energia	b	3	%
Taxa de capitalização (desperzando a inflação)	i	6	%
Número de condutores por fase do circuito	$N_p$	3	-
Número de circuitos do mesmo tipo	$N_c$	2	-
Tempo de operação com perda Joule máxima	T	4380	h/ano
Custo de 1 watt-hora para a carga definida [4]	P	0,000166	cu/w.h
Variação anual da demanda	D	0	-
Número de anos de operação	N	7	anos

Para os dados financeiros iniciais mostrados na tabela 6, obtem-se  $r = 0,991$ . Para o horizonte de tempo de 7 anos obtem-se  $Q = 6,814$ , e a variável auxiliar  $F = 14$ . Para encontrar o valor de seção mínima adequado pelo critério de condução de corrente (critério técnico), deve-se consultar a NBR5410. Segundo esta norma, a seção adequada para uma corrente de 12 A seria, no mínimo de  $2,5 \text{ mm}^2$  – que será o valor de referência. A temperatura média de operação é calculada por (4), que resulta em  $\theta_m = 27^\circ\text{C}$ . Com este valor de temperatura média de operação encontra-se os valores ajustados de resistência para as seções a serem testadas; portanto  $R^{2,5\text{mm}} = 0,0077$ ,  $R^{4\text{mm}} = 0,0048$ ,  $R^{6\text{mm}} = 0,0032$  e  $R^{10\text{mm}} = 0,0019$  (unidades em  $\Omega/\text{m}$ ). Os custos iniciais são calculados por (9), e os custos futuros são calculado por (10); cujos valores estão dispostos nas tabelas 7 e 8.

**Tabela 7 – Valores comparativos de custos do caso de iluminação pública**

Seção condutor [mm <sup>2</sup> ]	Custo inicial [cu]	Custo perdas em 7 anos	Custo Total Em 7 anos
2,5	8854	2188	11042
4	9926	1364	11290
6	10998	910	11908
10	13196	540	13736

**Tabela 8 – Custos relativos dos sistemas calculados**

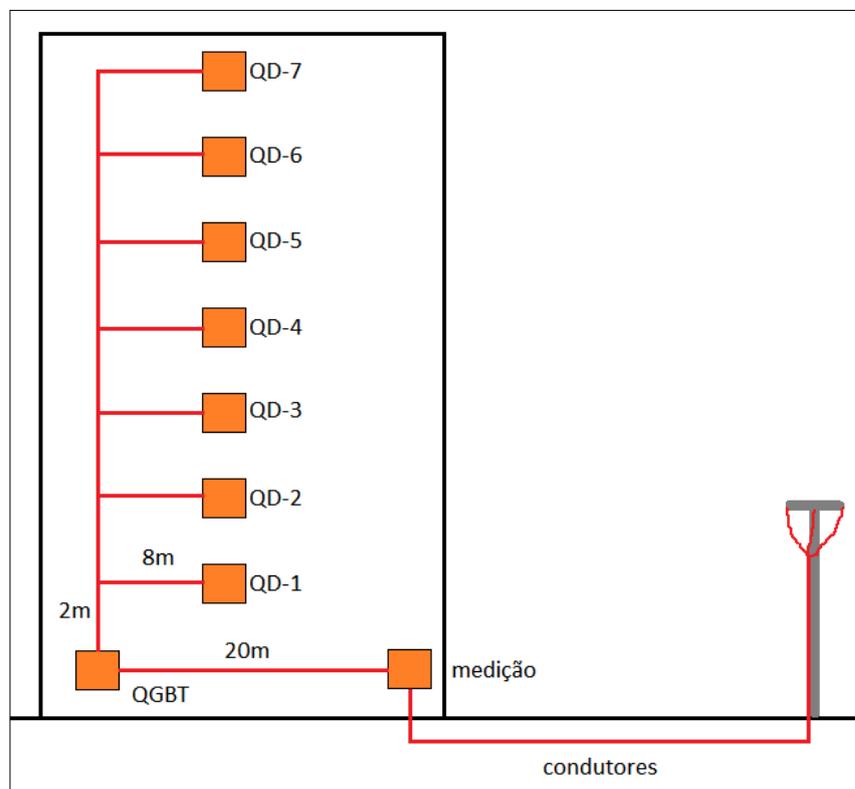
Seção condutor [mm <sup>2</sup> ]	Custo inicial [cu]	Custo total em 7 anos	Retorno do investimento
2,5	100 %	100 %	-
4	112 %	62,3 %	-
6	124 %	41,6 %	-
10	149 %	24,7 %	-

Pode-se concluir pelos dados comparativos na tabela 8, que a melhor seção a ser adotada para o sistema é a de 2,5 mm<sup>2</sup>. Apesar de ter um aspecto positivo na redução do custo das perdas Joule ao longo dos anos, este ganho não foi suficiente para compensar o aumento do custo inicial de instalação. Isso se deve ao fato da corrente ser baixa, do custo do kWh ser barato (custo mais baixo entre todas as categorias de preços de kWh) e do período de retorno ser um pouco curto (o usual são 20 anos). Para a seção de 2,5 mm<sup>2</sup>, a queda de tensão na lâmpada mais afastada é de 14,3 V, aproximadamente 11 %, que foi considerado aceitável neste caso. Para as seções de 4, 6 e 10 mm<sup>2</sup> a queda de tensão se torna ainda menos perceptível.

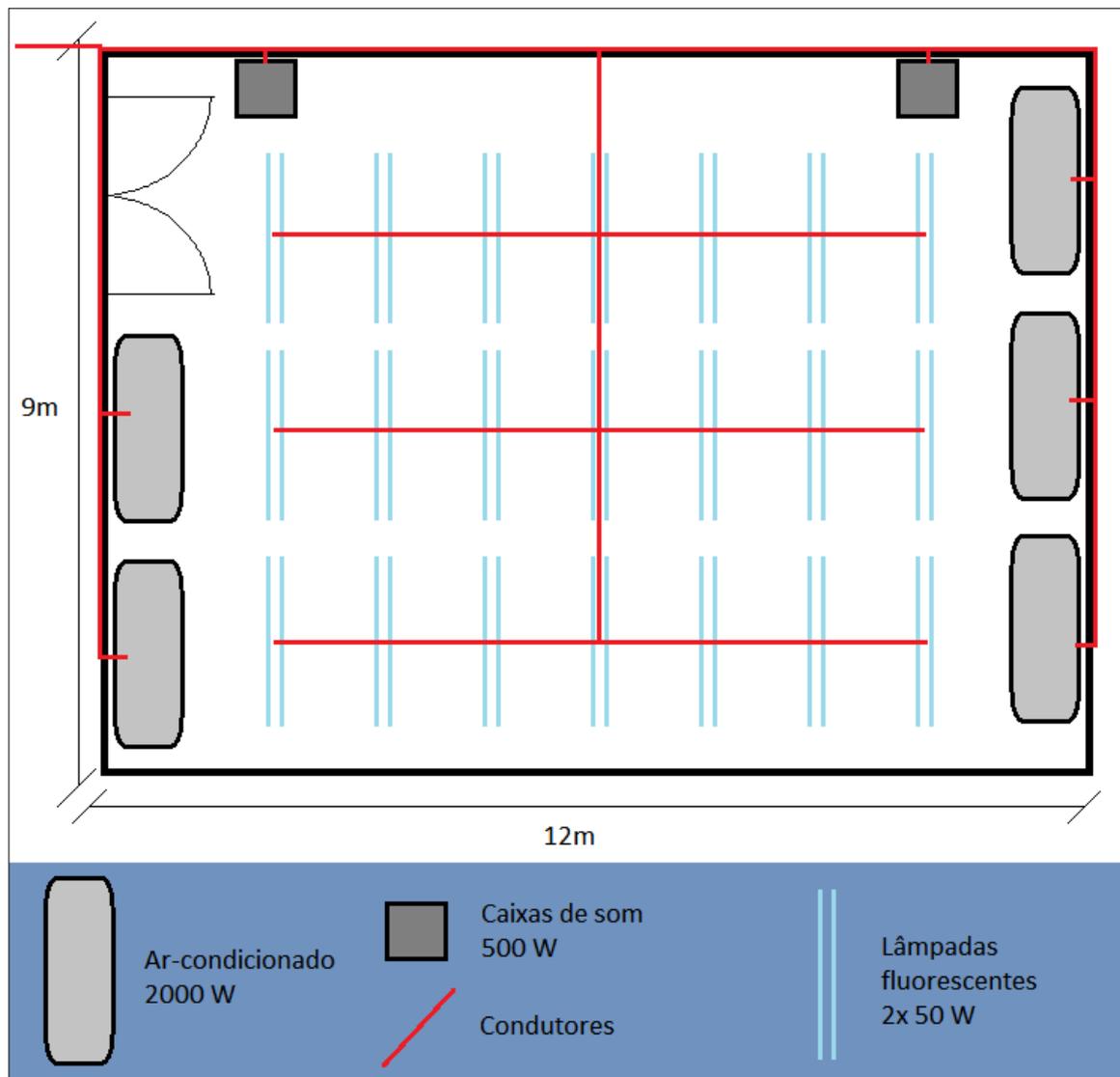
Conclui-se que para este caso, o método do dimensionamento econômico de condutores não é vantajoso. Este resultado poderia ser diferente se fosse implementado um sistema de iluminação alimentado com tensão de fase 220 V (ligação monofásica).

## 2.5 Estudo de caso – Instalação elétrica predial

O caso a ser estudado neste item simula uma edificação de curso de pré-vestibular. O modelo foi baseado em uma sala existente em um curso de Porto Alegre, em um prédio de 8 pavimentos. As principais cargas a serem consideradas foram: sistema de som, sistema de iluminação e ar-condicionado. A alimentação dos motores do elevador foi considerada de tal maneira que sua carga foi adicionada ao quadro de alimentadores. As figuras 16 e 17 ilustram os esquemas de ligações a as distâncias aproximadas usadas no modelo.

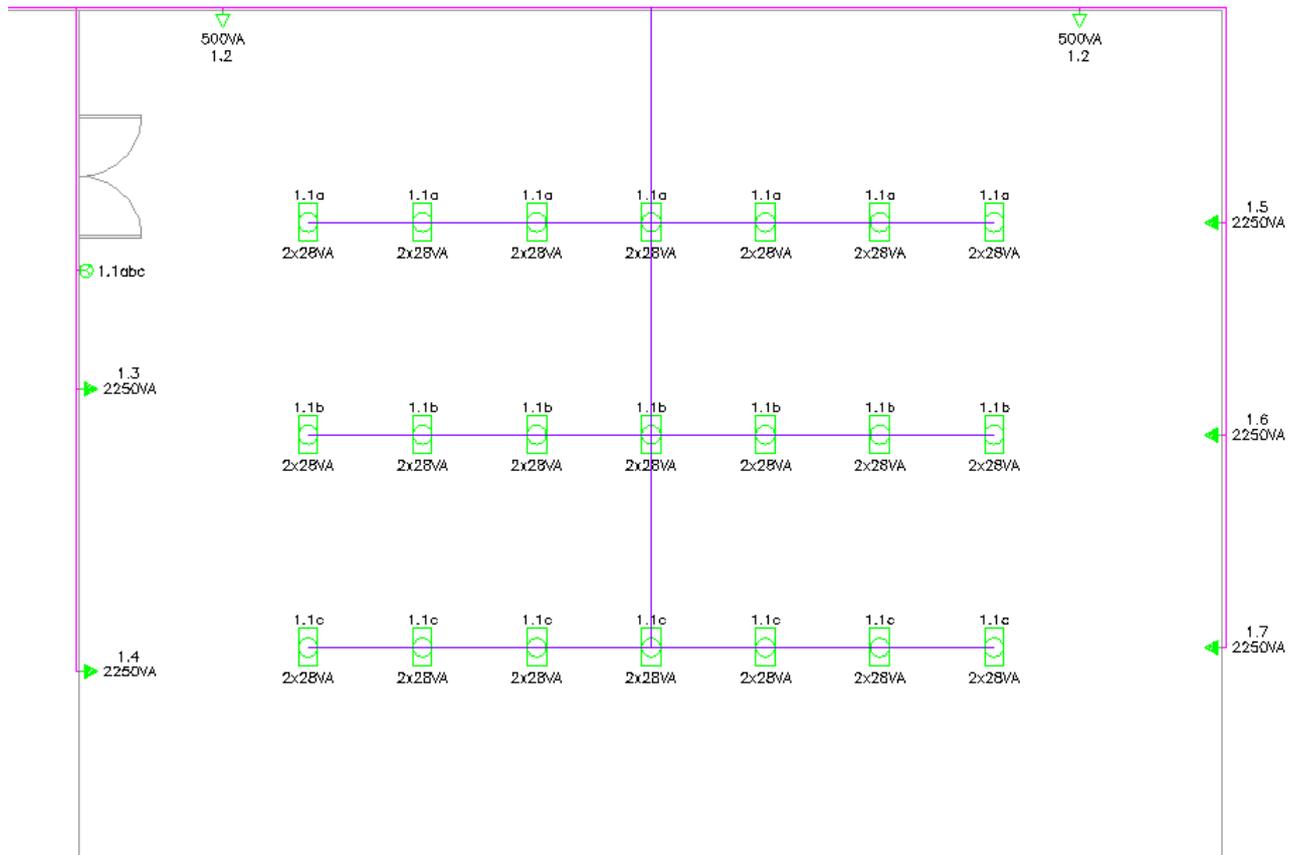


**Figura 16 – Modelo para estudo de instalação elétrica predial**



**Figura 17 – Modelo da sala de aula padrão estudada**

Como pode-se ver na figura 16, trata-se de uma edificação de 8 pavimentos, que a partir do primeiro andar é ocupada totalmente por salas de aula, salvo pelo corredor de acesso no qual está o elevador e a escada. Dentro das salas, as principais cargas foram destacadas na figura 17; e a figura 18 mostra os pontos de luz (lâmpadas fluorescentes) e força (ar-condicionado e som) na mesma sala, segundo a NBR5444 – Símbolos gráficos para instalações elétricas prediais. Os dados iniciais, com os valores usados nos cálculos são apresentados na tabela 10.



**Figura 18 – Pontos de luz e força da sala segundo NBR5444**

**Tabela 10 – Valores iniciais para caso de instalação elétrica predial**

Carga	Potência	Corrente	Comprimento	Regime diário	Seção usada
Iluminação	100 W	2 A	360 m	12 h	1,5 mm <sup>2</sup>
Som	500 W	4 A	90 m	10 h	2,5 mm <sup>2</sup>
Ar-Condicionado	2000 W	10 A	450 m	10 h	2,5 mm <sup>2</sup>
Alimentadores	2600W (3Φ)	9 A	90 m	10 h	4 mm <sup>2</sup>

Foi considerado um fator de potência de 0,9 para chegar a corrente de operação; as variáveis econômicas são idênticas ao caso anterior e o período de operação é 20 anos. Os

dados financeiros são os mesmos do caso 2.4, portanto, obteve-se o mesmo valor de “r” e “Q”. O número de condutores de fase por circuito é um para iluminação e dois para ar-condicionado ( $N_p=1$  e  $2$ ) e o número de circuitos é ( $N_c=1$ ). O custo do watt-hora é de  $P = 0,00028$  cu/w.h; e não há variação de demanda portanto  $D = 0$ . O método aqui aplicado foi aumentar em uma categoria a seção do condutor que foi baseado no critério de condução de corrente.

**Tabela 11- Resultados obtidos para caso de instalação elétrica predial**

Critério	Seção [mm <sup>2</sup> ]	Custo Inicial [cu]	Custo Inicial [%]	Custo de perdas [cu]	Custo de Perdas [%]	Custo Total [cu]	Custo Total [%]
Técnico	1,5 a 4	13.065	100	14.840	100	27.905	100
Econômico	2,5 a 6	13.939	107	9.322	63	23.261	83

Retorno de investimento aproximado de 3,2 anos

## 2.6 Estudo de caso – Alimentador de um quadro de distribuição

A seguir, será mostrado uma compilação de casos de estudo encontrados em fontes que utilizaram o método de dimensionamento econômico de condutores [26] [28] [33] [34]. Os quatro exemplos verificados tratam de cabos de um circuito alimentador de um quadro de distribuição. Os dados iniciais foram omitidos, pois deve-se ressaltar os dados finais obtidos pela aplicação do método de dimensionamento econômico de condutores.

**Tabela 12 – Compilação de casos verificados**

Caso verificado	Incremento da seção [mm <sup>2</sup> ]	Economia [cu]	Economia [%]	Retorno de investimento [anos]
Caso I	305	6.385	47	5,2
Caso II	115	18.451	46	2,3
Caso II	55	1.309	12	5,9
Caso IV	115	235.699	43	7,8

Fontes: [26] [28] [33] [34]

## 2.7 Conclusão

Os resultados obtidos no exemplo de iluminação pública não foram satisfatórios. O princípio foi comprovado, mas as metas (uma economia considerável) não foi alcançada. Os resultados obtidos no segundo caso, de um edifício comercial, que foram mais significativos, estão na ordem de 17 % de redução do custo final. Isso foi devido ao fato de haver uma maior corrente nos condutores, e da tarifa ser significativamente maior. Para os demais casos de circuitos alimentadores, houve a maior parcela significativa de ganhos, variando de 12 a 47 % de economia em relação ao custo inicial. O método de dimensionamento apresenta melhores resultados para os circuitos com seções iguais ou superiores a 25mm<sup>2</sup>, circuitos que operam em regime contínuo (com correntes que não apresentam grandes variações) e circuitos onde o critério técnico de dimensionamento que prevaleceu foi o de capacidade de corrente. Quanto maior seção do condutor, menor a queda de tensão no circuito, portanto a aplicação do método traz também mais segurança relativa a este critério. Para os valores dos parâmetros financeiros e elétricos usados pela norma, e quando aplicado em casos nos quais ele é recomendado, a economia no custo combinado (compra e operação) é da ordem de 50 %.

### **3. LUMINOTÉCNICA COM ÊNFASE EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

#### **3.1 Introdução**

Uma etapa muito importante no projeto de instalações elétricas, sejam elas residenciais, comerciais ou industriais, é a definição da quantidade e a potência dos pontos de iluminação. Esta definição, ou o estudo da aplicação de iluminação artificial em espaços interiores e exteriores – é chamado de luminotécnica (ou luminotecnia).

Tais escolhas devem obedecer a norma NBR 5413 – Iluminância de interiores, de 1992 [35]. Esta norma define valores de iluminância médias mínimas (em serviço) da iluminação artificial em interiores onde se realizam atividades de comércio, ensino, esporte, indústria e outras.

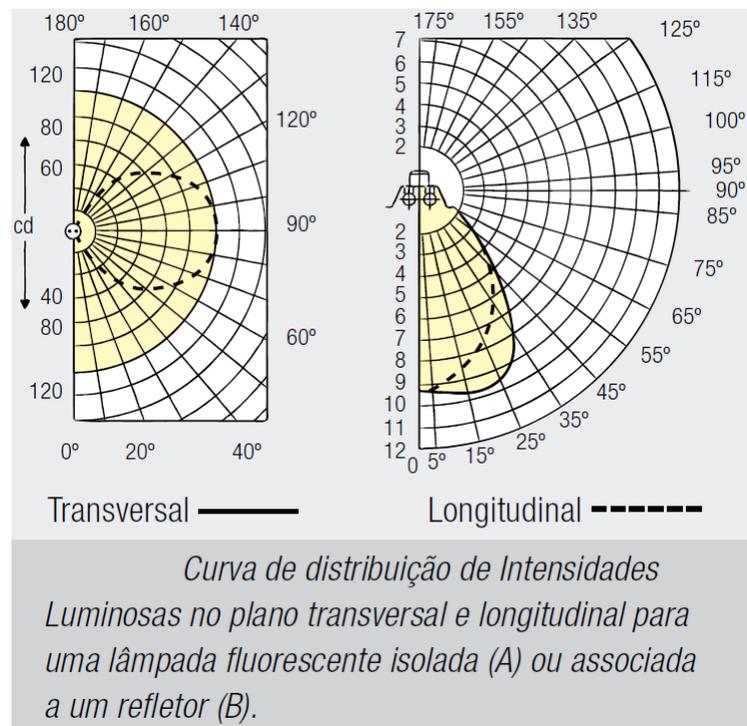
Serão vistos nesse capítulo, os principais conceitos e métodos relacionados a luminotécnica. Após analisar estes métodos, será apresentada uma solução para a escolha do tipo de lâmpada mais adequada para a iluminação, dando ênfase à eficiência energética e seus aspectos econômicos.

#### **3.2 Conceitos básicos & Unidades**

Os termos e unidades a serem utilizados nos cálculos estão definidas na NBR 5461 Iluminação – Terminologia [36], que por sua vez baseia-se em diversas normas da IEC. Na NBR 5461 são definidos inúmeros termos relacionados à iluminação e luminotécnica; de tal maneira que neste projeto só serão apresentados os mais pertinentes. A pesquisa dos dados desse capítulo foi realizada em manuais técnicos [37], apostilas [38], catálogos [39] e livros sobre iluminação [43][44].

### 3.2.1 Intensidade Luminosa

Intensidade Luminosa ( $I$ ) é o fluxo luminoso irradiado em direção de um ponto. Se a fonte luminosa irradiasse a luz uniformemente em todas as direções, o Fluxo Luminoso seria distribuído na forma de uma esfera. Mas devido à impossibilidade física de criar uma fonte luminosa isolada, este fato não ocorre. Para verificar-se como a luz se distribui saindo de uma fonte luminosa, os fabricantes fornecem uma curva de distribuição luminosa (CDL). Esta curva trata-se de um diagrama polar, no qual se considera a lâmpada (ou luminária, ou o conjunto) reduzida a um ponto no centro do diagrama, para poder representar a intensidade luminosa em função do ângulo. Costuma-se nesta representação polar, referir os valores de intensidade luminosa constantes a um fluxo de 1000 lumens. Este diagrama polar de intensidade é medido através de um aparelho chamado goniofotômetro. A figura 18 ilustra um diagrama típico. A unidade do SI para intensidade luminosa é a Candela (cd).



**Figura 19 – Diagrama polar de intensidade [37]**

### 3.2.2 Fluxo Luminoso

Fluxo Luminoso ( $\Phi$ ) é a quantidade de luz (ou potência de radiação total) emitida por uma fonte luminosa, na tensão nominal de funcionamento. Como o olho humano percebe somente os comprimentos de onda de luz de 380 a 780 nm, o fluxo luminoso está diretamente relacionado a esta quantidade de energia percebida pelo ser humano, e não à quantidade de energia total liberada pela fonte luminosa. A unidade do SI de fluxo luminoso é o Lúmen (lm). Como geralmente a lâmpada é instalada dentro de luminárias, o Fluxo Luminoso final disponível é menor do que o irradiado pela lâmpada, devido à absorção, reflexão e transmissão da luz pelos materiais com que são construídas as luminárias. Valores típicos de fluxo luminoso variam de 1000 lm (lâmpada incandescente) até 17000 lm (lâmpada multi-vapor metálico).

### 3.2.3 Eficiência energética (de fontes luminosas)

Eficiência Energética - ou rendimento luminoso ( $\eta_w$  ou K) - é a razão entre o fluxo luminoso e a potência nominal da fonte luminosa. A unidade de eficiência energética é o Lúmen por Watt (lm/W). Valores típicos de eficiência energética variam de 10 lm/w (lâmpada incandescente) até 120 lm/w (vapor de sódio em baixa pressão).

### 3.2.4 Iluminância

Iluminância – ou Iluminamento (E) é a relação entre o fluxo luminoso incidente numa superfície e a superfície sobre a qual este incide; ou seja é a densidade de fluxo luminoso na superfície sobre a qual este incide. A unidade do SI de iluminância é o lux (lx). Valores

típicos de iluminância variam de 0,25 (noite com lua cheia), 750 (valor médio mínimo para trabalhos de escritório) até 100.000 lux (dia ensolarado em local aberto).

$$E = \Phi/A \quad (17)$$

onde

$\Phi$  = fluxo luminoso [lm]

A = área iluminada [m<sup>2</sup>]

### 3.2.5 Luminância

Luminância (L) é a Intensidade Luminosa que emana de uma superfície, refletida pela sua superfície aparente (superfície vista pelo observador). É a única grandeza de todas já mencionadas percebidas pelo olho humano. Sua unidade é candela por metro quadrado (cd/m<sup>2</sup>). Pode ser calculada por uma das duas equações apresentadas abaixo:

$$L = \frac{I}{A \cdot \cos \alpha} \quad \text{ou} \quad L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (18)$$

onde

I = Intensidade Luminosa [cd]

$\alpha$  = ângulo considerado [°]

$\rho$  = Refletância ou Coeficiente de Reflexão

O excesso de luminância em um ambiente pode provocar o ofuscamento. Duas formas de ofuscamento podem gerar incômodos: ofuscamento direto, através de luz direcionada diretamente ao campo visual; e ofuscamento reflexivo, através da reflexão da luz no plano de

trabalho, direcionando-a para o campo visual. Valores de iluminância são incômodos para o ser humano a partir de 200 cd/m<sup>2</sup>.

### 3.2.6 Índice de reprodução de cor

Índice de Reprodução de Cor (IRC ou Ra) mede a qualidade da reprodução da cor quando iluminada por aquela fonte luminosa. O IRC é estabelecido entre 0 e 100, comparando-se a sua propriedade de reprodução de cor à luz natural (do sol). Portanto, quanto maior a diferença na aparência de cor do objeto iluminado em relação ao padrão, menor é seu IRC.

**Tabela 13 – Níveis de índice de reprodução de cor**

Nível de IRC	IRC (%)	Fonte luminosa	Aplicação adequada
Ótimo	90 ou +	Incandescente	Salas de tratamento médico, museus
Razoável	80	Fluorescente, LED (branco)	Escritório, lojas, oficinas, lojas de alimentos, salas de conferências
Ruim	60 ou -	Vapor de mercúrio e Vapor de sódio	Depósito, postos de gasolina, indústria, vias de tráfego, estacionamentos

Fonte: Iluminação Econômica – cálculo e avaliação, Gilberto J. C. da Costa [43].

A vida útil de lâmpadas está relacionada com a durabilidade em horas das lâmpadas e reatores. Sua unidade é horas de uso; e seus valores típicos variam de 1.000 horas de uso (lâmpadas incandescentes), 2.000 a 5.000 horas (halógenas), 7.500 a 20.000 (fluorescentes) e 28.000 a 32.000 (vapor de sódio em alta pressão). Vida Média é a medida aritmética do tempo de duração de cada lâmpada ensaiada. Vida Mediana é o número de horas resultantes, onde 50 % das lâmpadas ensaiadas ainda permanecem acesas.

### 3.3 Tipos de lâmpadas e luminárias

A tabela a seguir apresenta um resumo com as principais características de interesse do projetista de instalações elétricas.

**Tabela 14 – Características de lâmpadas**

Tipo de lâmpada	Vantagens	Desvantagens	Aplicação típica
Incandescente	Preço baixo, IRC elevado (aproximadamente 100)	Alta temperatura, eficiência muito baixa	Residencial
Incandescente halógena (inclui dicróica)	Luz brilhante e uniforme, design compacto, durabilidade	Alta temperatura, custo elevado	Iluminação focada, Fins decorativos
Fluorescente	Alta eficiência, durabilidade	IRC baixo (60-89), necessita de reator	Comercial e industrial
Fluorescente compacta (reator incorporado)	Alta eficiência, durabilidade, design compacto	IRC baixo (60-89), custo elevado	Residencial e comercial
Descarga em pressão (xenon, vapor de sódio e mercúrio)	Maior eficiência entre todos, durabilidade	Partida lenta (2 a 15 minutos), vapor de mercúrio atrai insetos, custo elevado, IRC baixo (20 a 40)	Iluminação de exteriores e vias públicas
Diodo emissor de luz (LED)	Eficiente, potência e tamanho muito reduzidos	Custo elevado em relação ao fluxo	Eletrônica* *ver item 3.7

Fonte: Manual “Iluminação: conceitos e projetos”, OSRAM 2010 [37], apostila UNICAMP [38].

### 3.4 Métodos de cálculo luminotécnico

Para chegar nos níveis de iluminância média mínimo definidos pela norma NBR 5413, deve ser feito uma série de cálculos. Além deste nível mínimo de iluminância, é importante observar as demais características do projeto: distribuição adequada (uniformidade) dos níveis de iluminância, a presença (ou não) de ofuscamentos dentro do campo visual, o índice de reprodução de cor do ambiente, e o aspecto econômico da instalação. Para auxiliar na tarefa de encontrar os níveis de iluminância adequado ao recinto, existem muitos softwares dedicados, estes geralmente baseados nos mesmos métodos. Os dois métodos principais de cálculo de iluminância, método dos lúmens e método ponto a ponto, são descritos a seguir.

#### 3.4.1 Método dos lúmens

Também conhecido como método das eficiências (ou método dos fluxos), é o método mais utilizado para edificações. Consiste em determinar o fluxo luminoso necessário para o determinado recinto, a partir da escolha dos parâmetros da equação 21. Para chegar aos valores de tais parâmetros, deve-se escolher (nesta ordem), os seguintes itens: tipo de atividade desenvolvida, cores das paredes e teto, e conjunto lâmpada-luminária.

Parte-se do cálculo do índice do recinto, também conhecido como fator do local, dado pela equação (18) em caso de iluminação direta, ou (19) para iluminação semi-direta ou indireta. Ambas as equações valem apenas para um ambiente quadrado ou retangular. Em caso de uso de luminária embutida, o valor de  $h$  é o mesmo de  $h'$ . Essa variável “K” é utilizada tanto no método dos lúmens quanto no método das cavidades zonais; mas deve-se ficar atento por que os métodos são incompatíveis. Para ter certeza de que a variável “K” é na

escala do método dos lúmens, seu valor deve variar de 0,6 a 5 na tabela consultada. O valor mais comum adotado para o plano de trabalho é 0,75 m.

$$K_{ilum.direta} = \frac{a.b}{h.(a+b)} \quad (19)$$

$$K_{ilum.indireta} = \frac{3.(a.b)}{2.h'.(a+b)} \quad (20)$$

onde

K = índice do recinto (ou fator do local)

a = comprimento do recinto [m]

b = largura do recinto [m]

h = pé-direito útil (distância entre a luminária e o plano de trabalho) [m]

h' = distância do teto ao plano de trabalho [m]

Com o valor do índice do recinto, deve-se consultar o valor do fator de utilização (Fu) em uma tabela relacionada à luminária (fornecida pelo fabricante), que deve-se assemelhar à tabela mostrada na figura 20. É no cálculo da fator de utilização que entram os valores de refletâncias do teto, parede e piso. Os valores mais comuns de refletância para teto branco, parede clara e piso escuro são 70 %, 30 % e 10 %.

TETO (%)	70			50			30		0
PAREDE (%)	50	30	10	50	30	10	30	10	0
PISO (%)	10			10			10		0
Kr	Fator de utilização								
0,60	34	29	26	33	29	26	29	26	25
0,80	40	36	33	39	35	32	35	32	31
1,00	45	41	38	44	41	38	40	38	36
1,25	50	46	43	49	45	43	45	42	41
1,50	53	50	47	52	49	46	48	46	45
2,00	58	55	52	56	54	52	53	51	50
2,50	60	58	56	59	57	55	56	55	53
3,00	62	60	58	61	59	58	58	57	55
4,00	64	63	61	63	62	60	61	59	58
5,00	66	64	63	64	63	62	62	61	59

*Exemplo de tabela de Fator de Utilização de Luminária*

**Figura 20 – Exemplo de tabela com o Fator de Utilização (Fu) [37]**

A variável fator de depreciação ( $F_d$ ) é decorrente da depreciação do fluxo luminoso da lâmpada e do acúmulo de poeira sobre lâmpadas e luminárias. Para compensar parte desta depreciação, estabelece-se um fator de depreciação – uma margem de segurança – para evitar que o nível de iluminância atinja valores abaixo do mínimo recomendado. Os valores padrão do fator de depreciação estão na tabela 15.

**Tabela 15 – Valores do fator de depreciação**

	Período previsto de manutenção (horas)		
	2.500	5.000	7.500
Ambiente limpo	0,95	0,91	0,88
Ambiente normal	0,91	0,85	0,80
Ambiente sujo	0,80	0,66	0,57

Fonte: Manual “Iluminação: conceitos e projetos”, OSRAM 2010 [37]

Com o fator de utilização calculado e o fator de depreciação escolhido, deve-se utilizar a equação (21) para então determinar a quantidade de luminárias adequada para o nível de iluminância almejado.

$$n = \frac{E_m \cdot A}{\varphi \cdot B \cdot F_d \cdot F_u} \quad (21)$$

onde

$n$  = quantidade adequada de luminárias

$E_m$  = iluminância média exigida por norma [lux]

$A$  = área do local [ $m^2$ ]

$\varphi$  = fluxo luminoso das lâmpadas [lm]

$B$  = fator de fluxo luminoso do reator (apenas para lâmpadas de descarga)

$F_d$  = fator de depreciação (tabelado, ver tabela 14)

$F_u$  = fator de utilização (variável auxiliar, ver figura 19)

### 3.4.2 Método Ponto a Ponto

Também conhecido como método das intensidades luminosas, este método é recomendado para casos em que a distância entre a fonte de luz e o objeto a ser iluminado for no mínimo 5 vezes maior do que as dimensões físicas da fonte de luz. Este método calcula o valor do iluminamento em um determinado ponto de uma superfície, para cada fonte luminosa cujo fecho atinja este ponto considerado. O iluminamento total será a soma dos iluminamentos proporcionados pelas unidades individuais. O método ponto a ponto está baseado nas Lei do inverso quadrado e a Lei de Lambert [29] que dizem, respectivamente, que o valor da intensidade luminosa decai com o quadrado da distância, e que a intensidade luminosa recebida em uma superfície depende do ângulo de incidência desta superfície com a fonte luminosa. Associando esses dois princípios, obtem-se a equação 22.

$$E = \frac{I^1}{h^2} + \sum \left( \frac{I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} \right) \quad (22)$$

onde

$E$  = iluminância final no ponto [lux]

$I^1$  = intensidade luminosa incidente perpendicular ao plano [cd]

$h$  = distância da fonte luminosa [m]

$I_\alpha$  = intensidade luminosa inclinada ao plano [cd]

$\alpha$  = ângulo de inclinação da fonte  $I_\alpha$  [°]

$\Sigma$  = somatório de “n” fontes luminosas

### 3.4.3 Aspectos econômicos da luminotécnica

Para que o custo total de um sistema de iluminação seja avaliado corretamente, deve-se calcular cuidadosamente as parcelas de custos iniciais e custos operacionais. A soma desses custos irá indicar o custo total do sistema. Os custos iniciais dos sistemas de iluminação dependem da mão-de-obra, do número de lâmpadas, luminárias e acessórios. Os custos operacionais dos sistemas de iluminação dependem do custo de manutenção (considerando a mão de obra e peças) do sistema como um todo, incluindo troca de lâmpadas, luminárias e acessórios. Além disso, o custo operacional engloba o gasto com energia elétrica. Deve-se destacar que o custo da manutenção em instalações de difícil acesso (iluminação pública, quadras de esporte e outdoors) pode ser bastante elevado. Também é comum calcular o valor do parâmetro “potência por m<sup>2</sup>” do determinado sistema a ser implantado. Este parâmetro pode ser o indicador de projetos luminotécnicos mais econômicos. Para avaliar os custos totais de um sistema de iluminação, pode-se recorrer a equações análogas ao tipo que foram usadas no dimensionamento econômico de condutores, como pode-se ver nas equações (8) e (23).

$$CT = CI + CO \quad (23)$$

onde

CT = custo total de implantação e operação [cu]

CI = custo inicial de implantação [cu]

CO = custo de operação do sistema [cu]

cu = unidade monetária arbitrária

$$CI = Mo + \Sigma(La + Lu + Ac) \quad (24)$$

$$CO = n \cdot tm(Pt \cdot P + \Sigma \frac{1}{Vu} (La + Ac)) \quad (25)$$

$$Pt = \frac{Q.W}{1000} \quad (26)$$

onde

Mo = custo de mão-de-obra da instalação [cu]

$\Sigma$  = custo de um conjunto de lâmpadas e/ou luminárias e/ou acessórios – contabilizar cada conjunto individualmente [cu]

La = custo da lâmpada [cu]

Lu = custo da luminária [cu]

Ac = custo de demais acessórios [cu]

n = número de dias de uso [dias]

tm = tempo de uso médio do sistema de iluminação por dia [horas/dia]

Vu = vida útil de determinada lâmpada [horas] (calcular cada tipo individualmente)

P = custo da energia [cu/KWh]

Pt = potência total instalada [kW]

Q = quantidade de unidades (lâmpada e acessórios) do sistema

W = potência consumida pelo conjunto (lâmpada e acessórios) [W]

Valor presente líquido significa trazer ao momento atual uma série de pagamentos ou despesas futuras, segundo uma taxa de desconto. Todos os custos associados à compra, operação e manutenção, incluídos impostos e taxas, do sistema de iluminação, são expressos em termos de seu valor presente. O valor presente de uma quantia qualquer é expresso pela equação (27).

$$VP = \frac{VF}{(1+I)^N} \quad (27)$$

onde

VP = valor presente líquido [cu]

VF = valor futuro [cu]

I = taxa de desconto para o período definido [%]

N = período em que a despesa futura ocorre [dia, mês, ano]

Outra variável de interesse é a chamada densidade de potência. Essa grandeza é útil principalmente para cálculos de dimensionamento de sistemas de ar-condicionado. Para que um sistema luminotécnico seja mais eficiente do que outro, deve apresentar o mesmo nível de Iluminância que outro e consumir menos watts por metro quadrado.

$$D = \frac{Pt \cdot 1000}{A} \quad (28)$$

onde

D = densidade de potência [W/m<sup>2</sup>]

Pt = potência total instalada [kW]

A = área do sistema de iluminação [m<sup>2</sup>]

Analogamente, existe a densidade de potência relativa. Esta por sua vez, considera a iluminância gerada por um sistema, além de sua potência instalada.

$$D_r = \frac{100 \cdot Pt}{A \cdot E} \quad (29)$$

onde

Dr = densidade de potência relativa [W/m<sup>2</sup>.100 lx]

Pt = potência total instalada [kW]

A = área do sistema de iluminação [m<sup>2</sup>]

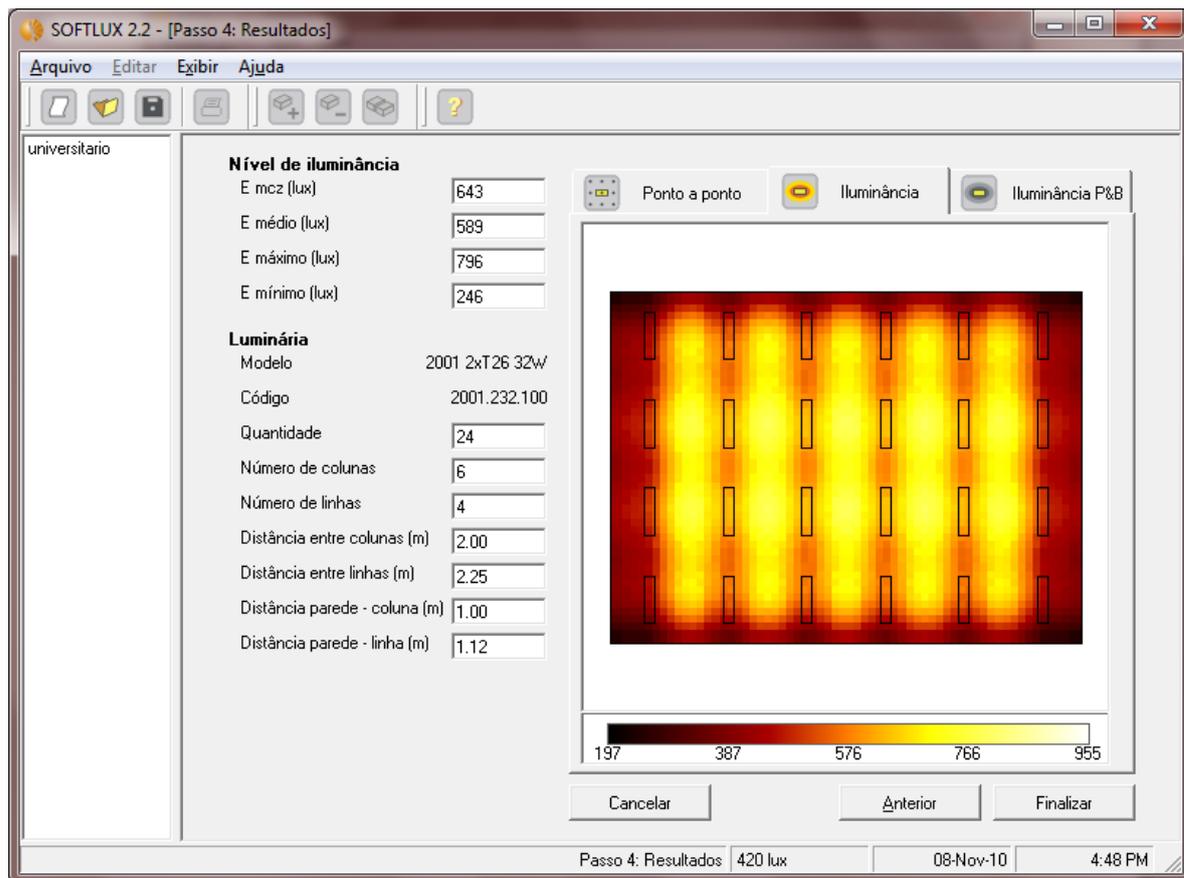
E = iluminância do sistema [lx]

Para auxiliar no cálculo do custo final do sistema, pode-se recorrer a diversos softwares, ou uma planilha auxiliar. A figura 21 mostra uma planilha cujo objetivo é auxiliar nestes cálculos, fornecida (gratuitamente) por um fabricante de lâmpadas e luminárias.

		Sistema Incandescente	Sistema Fluorescente
<b>Características do sistema de iluminação e ambiente</b>			
1 Modelo de lâmpada	-	PHILIPS STD127V100N	PHILIPS TL5-54W-HQ840
2 Fluxo luminoso nominal da lâmpada	lumens	1.620	4.450
3 Modelo do reator	-	-	LUXEL WRM154
4 Tecnologia do reator	-	-	eletrônico
5 Fator de fluxo luminoso do reator	-	1,00	1,5
6 Fluxo luminoso obtido por lâmpada = (2)x(5)		1.620	6.675
7 Modelo da luminária	-	CANDÉA 1XA60 60W	LUMIBRAS SOBR 2X40W
8 Nível de iluminação obtido ( Iluminância )	lux	501	516
9 Área do ambiente	m <sup>2</sup>	400	400
# Vida útil da lâmpada	horas	750	24.000
# Quantidade total de lâmpadas	unidades	216	40
# Quantidade total de luminárias	unidades	216	20
# Potência instalada em cada luminária (lâmpadas + acessórios)	watts	100	108
# Potência total instalada = ((12) x (13))/1000	kW	21.60	2.16
<b>Características de uso</b>			
# Tempo de uso mensal	horas/mês	240	240
# Consumo mensal de kWh = (14) x (15)	kWh/mês	5.184	518
# Durabilidade média das lâmpadas nesta aplicação = (10) / (15)	meses	3	100
<b>Custos dos equipamentos envolvidos</b>			
# Preço de cada lâmpada	R\$	1.41	21.68
# Preço de cada luminária	R\$	50.00	67.00
# Preço de cada acessório por luminária	R\$	0.00	48.00
# Custo do projeto + instalação	R\$	4.000.00	6.000.00
# Custo médio da energia elétrica (preço do kWh)	R\$	0.44	
<b>Custos dos investimentos</b>			
# Custos de equipamento para instalação = (11)x(18)+(12)x((19)+(20))+ (21)	R\$	15.104.56	9.167.20
# Diferença entre os custos de investimentos = (23)B - (23)A	R\$		-5.937.36
<b>Custos operacionais</b>			
# Custo do consumo mensal de energia = (16)x(22)	R\$	2.280.96	228.10
# Custo médio mensal de reposição das lâmpadas = ((11)x(15)x(18)) / (10)	R\$	97.46	8.67
# Redução no consumo de energia do sistema de ar condicionado	R\$		
# Somatório dos custos operacionais = (25)+(26)-(27)	R\$	2.378.42	236.77
# Diferença mensal entre custos operacionais = (28)A - (28)B	R\$		2.141.65
<b>Avaliação de rentabilidade</b>			
# Retorno do investimento = (24)/(29)	meses		-3
# Total economizado durante a vida útil da lâmpada = ((10)/(15)x(29))-(24)	R\$		220102
<b>Dados comparativos de consumo da instalação</b>			
# Densidade de potência Relativa = 1000*(14)/100*(9)/(8)		10.8	1.0
		( watts/m <sup>2</sup> para cada 100 lux )	

**Figura 21 – Planilha para cálculo de custo de sistema de iluminação**

A figura 22 mostra um software gratuito, cujo objetivo é calcular o nível de iluminância de um recinto. Nesse caso em específico, simulou-se uma sala de aula de um curso pré-vestibular, baseado em um modelo real. Pelos resultados obtidos, constatou-se que a iluminância média na sala está bem acima da média mínima recomendada pela norma.



**Figura 22 – Cálculo de iluminâncias com o software SOFTLUX**

De acordo com [43], para escolher o sistema de iluminação mais econômico, deve-se levar em consideração tanto os custos de investimento quanto os custos operacionais. Na maioria dos casos, o uso de lâmpadas de melhor eficiência energética leva a um investimento inicial maior, mas traz economia nos custos operacionais. Decorre daí a amortização dos custos, ou seja, há o retorno do investimento dentro de um dado período. O tempo de retorno é encontrado quando se calcula o quociente da diferença no investimento pela diferença na manutenção.

### 3.5 Índice para escolha de lâmpadas e luminárias

Para resumir a grande quantidade de informações, variáveis e parâmetros a serem avaliados para encontrar o conjunto lâmpada e luminária mais adequado para o sistema de iluminação, será apresentado um Índice de Prioridade (I.P.). Este índice deve ser aplicado sobre uma base de dados completa e com valores atualizados para que sua precisão seja maior possível. Sugere-se a aplicação deste índice em uma tabela com todos os dados necessários, de forma que seja criada uma coluna específica para o índice. Depois, se as lâmpadas forem ordenadas de ordem crescente (quanto maior o índice, mais econômico é o conjunto), tem-se a prioridade para a escolha.

$$IP = \frac{\phi.V_u.\eta_1\eta_2}{C.P} \quad (30)$$

onde

I.P. = índice de prioridade

$\phi$  = fluxo luminoso da lâmpada [lm]

$V_u$  = vida útil da lâmpada [k.h]

$\eta_1$  = rendimento da luminária

$\eta_2$  = rendimento do reator

$C$  = custo total dos conjuntos (lâmpada+luminária+acessórios+mão-de-obra) [cu]

$P$  = potência do conjunto [W]

Antes de aplicar este índice, deve-se decidir anteriormente se o seu IRC de determinada lâmpada é ou não adequado ao sistema. Se não for adequado, pode-se simplesmente excluir aquela lâmpada, como uma forma de filtragem das escolhas. Um exemplo da aplicação deste índice será apresentado em 3.6.

### 3.6 Estudo de caso – comparação de custos de sistemas de iluminação

Para título de comparação, estipulou-se que um sistema de iluminação de área unitária (1 m<sup>2</sup>) necessita de uma iluminância média de 1400 lux. O período de observação do sistema é de 100.000 horas. Considerou-se que existem três opções viáveis para atender este nível médio de iluminância – com lâmpadas incandescentes, fluorescentes compactas e LEDs.

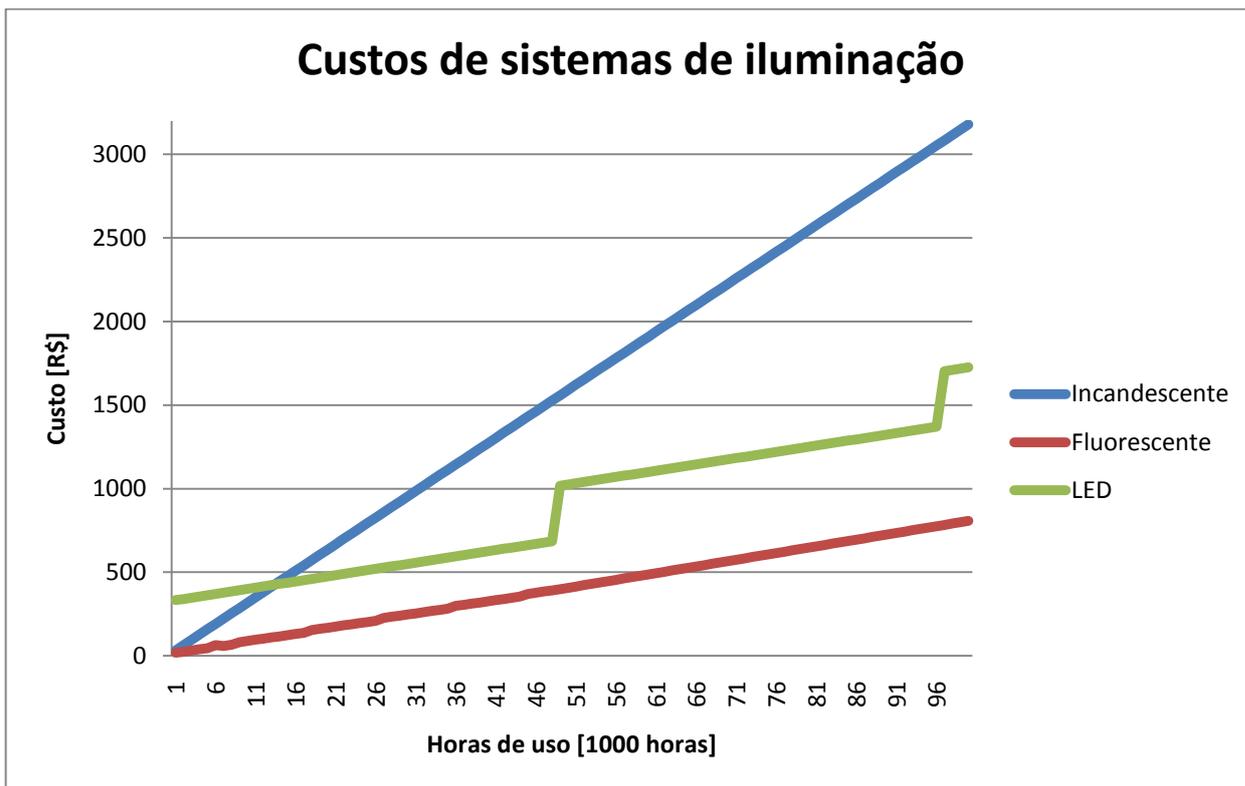
No estudo deste caso, admitiu-se inflação nula (pois iria afetar os custos dos sistemas igualmente), desprezou-se o custo das luminárias e o custo de mão de obra foi considerado o mesmo para qualquer tipo de instalação. Como consequência de não considerar inflação, para manter uma consistência nesse cenário econômico, não foi usado o valor presente líquido. Também foi considerado que todas as lâmpadas atendem o IRC mínimo adequado para aquele recinto.

**Tabela 16 – Dados das lâmpadas utilizadas no sistema**

	Custo (R\$)	Potência (W)	Vida útil (1000 h)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência (lm/W)	IRC (%)
Incandescente	1,8	100	1	1350	13,5	100
Fluorescente compacta	11	23	6	1400	60,8	80-89
Lâmpada LED (x5)	325	25	48	1415	56,6	60-80

Fonte: Pesquisa de mercado

As equações utilizadas foram 23, 24, 25, 28 para elaborar o gráfico da figura 23; e a equação 29 para o cálculo do índice de prioridade, mostrado na tabela 17.



**Figura 23 – Custos de sistemas de iluminação**

**Tabela 17 – Índice de prioridade e Densidade de potência relativa calculados**

	IP	$D_r$ ( $W/m^2$ )
Incandescente	7,5	7,4
Fluorescente compacta	33,2	1,64
Lâmpada LED (x5)	8,35	1,76

### 3.6.1 Avaliação dos resultados obtidos

Após a cuidadosa análise do gráfico, conclui-se que o sistema de iluminação mais econômico entre as três alternativas é o das lâmpadas fluorescente compactas. Mas a avaliação correta das opções existentes é mais complexa, pois deve levar-se em conta uma série de outros aspectos.

O sistema composto pela lâmpada incandescente tem como vantagem um IRC unitário, mas por outro lado tem a maior densidade de potência relativa, o que quer dizer que ele irá gerar muito mais calor do que os outros, podendo causar até mesmo uma mudança de temperatura no ambiente. O sistema composto pela lâmpada fluorescente compacta tem como vantagem um custo baixo inicial, assim como uma boa eficiência energética e IRC bom. Sua vida útil é melhor que a incandescente, mas bem longe da vida útil dos LEDs. O LED possui um IRC menor, e o custo de cada lâmpada é muito maior que a dos outros sistemas.

Conclui-se que a aplicação do I.P. foi bem sucedida, pois avaliou corretamente a ordem de custos dos três sistemas quando comparados ao longo do tempo. Porém, proporções entre as curvas de custo e o I.P. não ficaram próximas. O I.P. indica que a lâmpada fluorescente é muito mais apta do que a lâmpada LED, o que no gráfico não fica tão acentuado. O índice de densidade de potência relativa ( $D_r$ ), por outro lado, traz resultados inconclusivos.

### **3.7 Tópico especial – Diodos Emissores de Luz**

Este tópico tem como objetivo compilar uma série de informações importantes relacionadas à LEDs. O diodo emissor de luz (em inglês LED) é um dispositivo semicondutor que quando polarizado, emite luz em um determinado comprimento de onda. Esse comprimento pode ser fixo ou pode variar, fazendo com que o LED gere diversas cores, em diferentes intensidades, em tempo real.

De acordo com [41], a comercialização de produtos de iluminação à base de LEDs cresce anualmente de 40 a 60 % no últimos anos; e até 2012, espera-se que o mercado mundial atinja o valor de 1,6 US\$ bilhão. As perspectivas em 2008, como visto em [42] eram mais singelas, e indicavam um crescimento do setor de apenas 14% ao ano. Projeções

otimistas esperam que até 2015 sejam substituídos 20 bilhões de lâmpadas tradicionais (incandescentes) por lâmpadas LED. Também em 2015, haveria o mesmo número de lâmpadas LED do que as lâmpadas fluorescente compactas, e em 2020 a lâmpada incandescente seria uma raridade. Outra projeção diz que o custo dos lumens por LED tende a cair 50 % a cada ano que passa, redução causada pela evolução da tecnologia e do processo de fabricação.

No Brasil, o mercado já ultrapassa a marca de 100 US\$ milhões. A baixa aceitação dos produtos tem sido restrita pelo seu alto preço, mesmo com todas as vantagens ambientais. Para que o Brasil se torne um país competitivo e possa crescer no setor, deve-se produzir todos os componentes em território nacional (atualmente só ocorre montagem), e que ocorra uma sensível redução tributária.

### **3.7.1 Características vantajosas de LEDs**

O LED possui baixo consumo, baixo custo de manutenção, vida útil longa, e suas dimensões compactas proporcionam uma grande variedade e flexibilidade nos tipos de aplicações. A sua partida é instantânea, e não sofre desgaste com ligamentos e desligamentos. Possui alta resistência à vibração. O LED emite luz somente na banda visível do espectro, fazendo com que seu feixe de luz seja frio e não emita radiação infra-vermelha ou ultravioleta. A sua luz é direcionada, o que aumenta a eficiência em aplicações de luz focada, e diminui a necessidade de luminárias. Possui uma boa eficiência luminosa (de 30 a 80 lm/W), e tem um IRC bom (em torno de 80). O LED pode ser dimmerizado em até 10 % de sua potência nominal. Do ponto de vista ecológico, destaca-se que em sua composição não são utilizados metais pesados; e a sua eficiência elevada faz com que as emissões de gas

carbônico na atmosfera sejam menores. Também existe uma série de vantagens na área de iluminação decorativa.

### **3.7.2 Características desvantajosas de LEDs**

O custo inicial é muito elevado se comparado com as opções de mercado; para que haja compensação deste custo é necessário uma aplicação de muitas horas diárias - lâmpadas que permanecem todo (ou quase todo) o dia ligado, como hospitais e shopping centers. O desempenho do LED depende da temperatura de operação do conjunto. Uma temperatura de operação elevada ou superaquecimento do conjunto pode levar à sua falha. Portanto é necessário garantir uma dissipação térmica adequada para o ambiente no qual o LED irá atuar. Essa condição é especificamente importante em aplicações como iluminação e sinalização automotiva, equipamentos médicos e aplicações militares; aplicações em que o dispositivo deve funcionar em uma grande faixa de temperaturas ao longo de sua vida útil, e não deve ocorrer falhas. O LED não opera em corrente alternada, e depende de um circuito auxiliar (em geral uma fonte chaveada) para que a corrente seja fornecida de maneira adequada ao seu funcionamento. Esse circuito auxiliar é responsável por uma queda no fator de potência do conjunto, causando um maior estresse na rede elétrica ao qual o conjunto está ligado. O fator de potência é raramente mencionado em manuais e catálogos, mas como verificado em [40], varia entre 0,7 e 0,8. Ainda existe uma questão quanto ao uso de LEDs azuis ou LEDs brancos; estes LEDs geram luz no espectro muito próximo do azul, que pode vir a gerar uma maior poluição luminosa do que outras fontes de luz.

## 4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES E TRANSFORMADORES

### 4.1 Introdução

Neste capítulo será visto a eficiência energética de cargas indutivas, mais particularmente motores e transformadores. Inicialmente serão apresentados conceitos e as origens das perdas, e depois serão vistos vários itens que irão mostrar como é feita a efficientização destas cargas indutivas, com exemplos práticos.

De [45], tem-se que o rendimento de máquinas elétricas, transformadores, ou outros dispositivos conversores de energia, pode ser determinado pela equação (31), descrita a seguir:

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Saída}}{\text{Entrada}} = \frac{(\text{Entrada} - \text{Perdas})}{\text{Entrada}} = \frac{\text{Saída}}{(\text{Saída} + \text{Perdas})} \quad (31)$$

A eficiência de máquinas rotativas é normalmente bem elevada, exceto quando suas cargas são leves. Para motores de 1 a 10 kW, o rendimento de plena carga é de 80-90 %, para motores de 11 a 100 kW, o rendimento de plena carga é de 90-95 %; e acima de 200kW, o rendimento cresce poucos pontos percentuais. Esses rendimentos são determinados geralmente a partir de medições de perdas. Esses valores de eficiência variam consideravelmente conforme a categoria de eficiência das máquinas; categorias estas determinadas por normas como ABNT NBR17094-1 e IEC60034-2-1. Essas normas que determinam como medir, quantificar e qualificar as perdas das máquinas elétricas são determinadas por instituições como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a American National Standards Institute (ANSI) e National Electrical Manufacturers Association (NEMA).

## 4.2 Eficiência energética em motores elétricos

### 4.2.1 Perdas em máquinas elétricas

Neste item será visto a origem das perdas em máquinas elétricas, e algumas soluções e medidas que podem ser tomadas para diminuí-las. As soluções apresentadas podem ser implementadas tanto na etapa de projeto quanto após sua fabricação (ou aquisição). As perdas de máquinas elétricas podem ser divididas em: perdas ôhmicas, perdas mecânicas, perdas magnéticas e perdas suplementares.

As perdas ôhmicas (ou perdas por efeito Joule ou perdas  $I^2R$ ) tem origem nos enrolamentos estáticos e barras rotóricas das máquinas elétricas. Como estas perdas dependem do valor da resistência dos enrolamentos, essas perdas aumentam conforme a corrente e a temperatura aumentam. Uma outra parcela que contribui para as perdas ôhmicas são as perdas nos contatos das escovas dos anéis deslizantes e comutadores. Essas perdas dos contatos são normalmente desprezadas em máquinas síncronas e de indução. Em máquinas de corrente contínua (CC) de tipo industrial, essa queda de tensão nas escovas é vista como uma constante de total de 2 V quando são usadas escovas de carvão e grafite com cabos flexíveis enroscados de ligação. Para diminuir as perdas ôhmicas, pode-se aumentar a área das ranhuras de modo que mais cobre possa ser usado, aumento a área da seção transversal dos enrolamentos. Esse incremento irá diminuir a resistência total, diminuindo as perdas, mas irá incrementar o custo inicial das máquinas.

As perdas mecânicas tem origem no atrito das escovas e mancais. Quando existe um sistema de ventilação próprio, há perda mecânica na potência necessária para fazer o ar circular por dentro da máquina e pelo sistema de ventilação. As perdas mecânicas são

frequentemente combinadas com as perdas no núcleo sendo determinadas ao mesmo tempo. Podem ser amenizadas através de seu revestimento, como será visto em 4.2.2.

As perdas magnéticas em circuito aberto ou vazio, consistem nas perdas por histerese e por correntes parasitas se surgem da alteração das densidades de fluxo no ferro da máquina quando apenas o enrolamento principal de excitação está energizado. Em máquinas de CC e síncronas, essas perdas estão confinadas principalmente no ferro da armadura, enquanto que nas máquinas de indução essas perdas estão confinadas em sua maior parte ao ferro do estator. As perdas por correntes parasitas variam com o quadrado da densidade de fluxo, da frequência, espessura das chapas, do volume de ferro e da resistividade do ferro (em outras palavras, a qualidade do material utilizado). As perdas por histerese dependem da densidade de fluxo, da frequência, do volume de ferro e da resistividade do ferro. Quando a máquina está carregada, a distribuição espacial da densidade de fluxo altera-se de forma significativa pela força magneto-motriz, fazendo com que as perdas reais no núcleo podem se elevar de forma notável. As perdas magnéticas podem ser reduzidas diminuindo a densidade do fluxo magnético no núcleo da máquina; que pode ser feito aumentando o volume do núcleo, melhorando as propriedades magnéticas do núcleo. As perdas nas correntes parasitas podem ser reduzidas utilizando chapas de ferro mais finas na construção da máquina.

As perdas suplementares consistem em perdas que se originam na distribuição não-uniforme de corrente no cobre e em perdas adicionais no núcleo, produzidas no ferro pela distorção do fluxo magnético pela corrente de carga. Em máquinas síncronas e de indução, podem ser obtidas por ensaios; em máquinas CC, admite-se por convenção o valor de 1 % da saída. As perdas em motores elétricos podem ser expressas pela equações (32) e (33).

$$P = P_{fe} + P_j + P_{mec} + P_{su} \quad (32)$$

$$P_{fe} = P_H + P_F \quad (33)$$

onde

$P$  = Perdas totais no motor [p.u.]

$P_{fe}$  = Perdas no ferro [p.u.]

$P_j$  = Perdas Joule (ou perdas Ôhmicas) [p.u.]

$P_{mec}$  = Perdas mecânicas [p.u.]

$P_{su}$  = Perdas suplementares [p.u.]

$P_H$  = Perdas por histerese [p.u.]

$P_F$  = Perdas por correntes parasitas de Foucault [p.u.]

A partir da equação 32, foi possível chegar (experimentalmente) a uma equação mais detalhada, que inclui mais fatores relevantes da construção e da operação do motor. As perdas totais por unidade de um motor de indução operando com tensão e frequência variáveis pode ser expressa pela equação (34) [46].

$$P = P_{in} \left[ (k_{i0}^2 \cdot k_{i0n}^2) + \frac{k_T^2 \cdot k_m^2}{\left(\frac{E}{f}\right)^2} \right] + P_{Hn} \left(\frac{E}{f}\right)^4 + P_{Fn} \left(\frac{E}{f}\right)^4 \quad (34)$$

$$K_{i0} = \left(\frac{E}{f}\right)^{3,4} \text{ para } \left(\frac{E}{f}\right) \geq 1 \quad (35)$$

$$K_{i0} = \left(\frac{E}{f}\right)^1 \text{ para } \left(\frac{E}{f}\right) < 1 \quad (36)$$

$$K_{i0n} = \left(\frac{I_0}{I_n}\right) \quad (37)$$

$$K_m = \left(\frac{1+P_{mn} \cdot f^3}{1+P_{mn}}\right) \quad (38)$$

onde

$P$  = Perdas no motor de indução [p.u.]

$P_{in}$  = Perdas Joule do motor sob condições nominais de carga, tensão e frequência [p.u.]

$P_{Hn}$  = Perdas por histerese sob condições nominais de carga, tensão e frequência [p.u.]

$P_{Fn}$  = Perdas por correntes parasitas totais do motor sob condições nominais de carga, tensão e frequência [p.u.]

$E$  = Tensão de operação [V]

$f$  = Frequência de operação [Hz]

$K_{i0}$  = Fator de correção da corrente a vazio

$I_0$  = Corrente em vazio sob tensão e frequência nominais [A]

$I_n$  = Corrente com plena carga sob tensão e frequência nominais [A]

$K_{i0n}$  = Fator de corrente a vazio

$P_{mn}$  = Relação entre as perdas mecânicas nominais do motor e a potência útil nominal

$KT$  = Fator de correção do conjugado

Valores típicos de  $P_{in}$ ,  $P_{Hn}$ ,  $P_{Fn}$ , para motores fabricados com núcleo magnético de baixas perdas (aço silício totalmente processado), operando em condições nominais, são 80 %, 12% e 8 %, respectivamente. O fator  $K_{i0}$  tem origem devido à não-linearidade da curva de magnetização do material ferro-magnético; fazendo com que a corrente a vazio aumente, segundo (36) e (37), conforme a relação “ $E/f$ ” aumenta.

Além das perdas relacionadas intrinsecamente à operação dos motores elétricos, outra fonte extremamente comum do baixo rendimento nessas máquinas é a falta de adequação entre o motor e sua aplicação. Essa inadequação ocorre frequentemente, devido em grande parte à dificuldade de se caracterizar as cargas de operação; e a tendência de adicionar uma boa margem de segurança nos seus dimensionamentos. Essa margem de segurança garante que o sistema irá funcionar diante de incertezas de projeto, mas irá prejudicar o seu rendimento.

#### 4.2.2 Solução do fluxo ótimo

Baseado na equação (35), é possível conceber o uso de um fluxo ótimo que minimize as perdas do motor. Como visto em [46], a redução da frequência acarreta redução das perdas no ferro do motor, permitindo que a indução magnética (ou fluxo) aumente nas baixas velocidades de operação, para que o motor mantenha o conjugado com menos corrente. O aumento do fluxo é obtido pelo aumento da realção “E/f”, de maneira tão mais acentuada quanto mais baixa for a frequência de operação. Essa solução é implementada através de um conversor estático de frequência. A esse conjunto (inversor + motor), concebido para otimizar os acionamentos de velocidade variável com cargas que demandam conjugado constante em toda faixa de operação, foi patenteado como “Solução Fluxo Ótimo”.

#### 4.2.3 Aspectos do revestimento em máquinas elétricas

A tecnologia do revestimento, que tem como função principal a proteção dos motores e seus acessórios acoplados, pode contribuir também para a eficiência energética de motores que atuam com determinadas cargas. Bombas e ventiladores tendem a diminuir sua eficiência ao longo do tempo, devido ao desgaste do revestimento. Com a aplicação de revestimentos apropriados, pode-se reduzir o consumo de energia em 20 % (bombas) e 4 % (ventiladores). Os dados indicam que as melhorias na eficiência ocorrem principalmente com o revestimento do rotor. Além do aspecto econômico, há um aumento da vida útil, menor intervalo de tempo entre suas manutenções, e menor chance de ocorrerem interrupções na produção industrial. A redução dos riscos associados ao desenvolvimento de determinados materiais no rotor e dentro do invólucro dos ventiladores também deve ser considerada. Em relação aos custos, se a aplicação envolve uma operação com volume suficiente e/ou número de horas de operação

anual atingir um determinado nível, apenas a economia de energia obtida já pode compensar o revestimento. Os resultados obtidos nesses estudos indicam que a tecnologia de revestimento pode ser eficaz e economicamente viável para bombas de todos os tamanhos e, pelo menos, para os ventiladores de construção axial e centrífuga. O revestimento considerado nos testes é de epoxi (tem característica de forte adesão e suportabilidade) extremamente resistente, reforçado com partículas de cerâmica [48].

#### **4.2.4 Acionamentos de velocidade variável**

A utilização de acionamentos de velocidade variável é indicada como forma de diminuir o consumo e aumentar a eficiência energética dos motores. É adequado para motores que operam sob carregamento variável. No caso estudado em [47] foi realizado uma substituição das válvulas de controle de fluxo utilizadas nas máquinas acionadas por motores elétricos que não precisam trabalhar em plena carga a maior parte do tempo (bombas e ventiladores), por acionamentos variáveis, os quais ajustam a velocidade do motor em função das condições de demanda. No caso [47] em específico, o investimento realizado retornou em um prazo menor que cinco anos (a média de todos os motores foi de 3,8 anos) , e os investimentos realizados nos acionamentos foram da ordem de 60.000 €. A economia de energia (em kWh) foi, em média 35,2 % por motor; fator este que depende muito do perfil de operação do motor (é determinado fazendo levantamento de dados, que geram um gráfico de porcentagem de uso da carga por tempo de operação).

A utilização do inversor de frequência associado à obtenção de menores níveis de pressão de trabalho de um sistema hidráulico ou de ventilação pode proporcionar significativa economia de energia no controle de vazão ou do fluxo de ar e menores desgastes dos equipamentos do sistema. Quando se utiliza a vazão controlada por um inversor de frequência

em vez do estrangulamento do fluido por meio de válvula, a economia de energia é significativa, chegando a até 74 % para o caso de vazão de água ou até 85 % para o caso da vazão de ar (ventilador). A economia de energia total com a utilização do inversor de frequência depende das características do sistema, dos níveis operacionais e do tempo que o sistema permanece em funcionamento.

Outra opção de acionamento mais econômica, quando o motor não exige variação da velocidade, necessitando apenas de uma partida mais suave, de forma a limitar a corrente de partida (corrente “Inrush), é a utilização de “soft-starters”. Esses “soft-starters” são circuitos eletrônicos compostos geralmente por pontes tiristorizadas.

#### **4.2.5 Exemplos de melhorias em sistemas motrizes industriais**

As bombas, ventiladores e sistemas de ar comprimido respondem por cerca de 70 % do consumo total de energia elétrica da indústria [45] [49]. Estudos de 2006 da International Energy Agency (IEA) apontam um potencial de melhoria de 25 % para os sistemas motrizes industriais, sem considerar o potencial de melhoria dos processos e a demanda marginal de economia resultante das mudanças na distribuição e uso de energia. A tabela 18 aponta melhorias possíveis para essas situações.

Fugas de ar em sistemas de ar comprimido podem desperdiçar 30 a 50 % do ar comprimido. Um compressor de ar em vazio consome aproximadamente 25 % da energia de plena carga. Dependendo do ciclo, o tempo de operação sem carga responde por 30 a 70 % do tempo total de trabalho. Para corrigir isso, recomenda-se o uso de sistemas de controle inteligente acoplados a máquinas de diferentes tamanhos. Em um estudo com 5 empresas, a economia de energia deste item foi da ordem de 7 %. Os casos investigados tiveram redução com gastos de energia de 9 a 86 %, e o tempo de retorno variou de 2 meses a 2 anos. Essas

variações indicam que o potencial de economia varia muito conforme o porte da indústria e o tipo de carga instalada.

**Tabela 18 – Exemplos de economia de energia em sistemas de acionamento de motores**

Tipo de aplicação	Melhoria sugerida
Ar comprimido	Dimensionamento adequado do motor, reduzir os vazamentos de ar, otimizar o sistema de pressão de ar, melhorar o sistema de controle do compressor
Ventiladores	Dimensionamento adequado do motor, instalar um controle de demanda (inversor de freqüência), otimizar a escala de operação
Bombas	Uso de acionamentos de velocidade variável
Acionamentos	Dimensionamento adequado do motor, motores de alto rendimento, transmissão de alta eficiência

Fonte: Barbosa, Eficiência energética e métodos de controle de vazão. Revista Eletricidade Moderna[49]

### 4.3 Eficiência energética em transformadores

Transformadores são máquinas elétricas estáticas, cujo rendimento é bastante alto, quando comparado com máquinas elétricas rotativas, motores e geradores, já que não apresentam perdas mecânicas por atrito e ventilação. Os transformadores mais comuns são os de distribuição (até 500 kVA) e força (acima de 500 kVA). Também são extremamente comuns na área de eletro-eletrônica, mas como tratam de tensões e potências muito menores, estes não serão considerados. Devido à típica curva de consumo, o transformador de distribuição opera a maior parte do dia com aproximadamente 50 % de sua potência nominal e somente na faixa de tempo compreendida entre 17 e 22 horas opera à plena carga; por outro

lado o transformador de força opera geralmente a plena carga. Estas características operacionais distintas implicam diferentes critérios de projeto para os dois tipos de transformadores. Enquanto que para o primeiro é interessante que o rendimento máximo ocorra em torno de 40 % da potência nominal, no caso do transformador de força o rendimento máximo deve ocorrer próximo a potência nominal.

#### 4.3.1 Normatização das perdas do transformador pela ABNT

As principais normas que tratam de transformadores são: NBR 5356 Transformadores de potência – especificação [55], NBR 5440 Transformadores para redes aéreas de distribuição – padronização [56], e NBR 5380 - Transformadores de potência – método de ensaio [57]. Essas normas tratam de padronizar e estabelecer valores mínimos e máximos de diversas características dos transformadores. A figura 24 mostra que as perdas dos transformadores variam não-linearmente conforme sua potência nominal.

<i>Potência do transformador [kVA]</i>	<i>Corrente de excitação [%]</i>	<i>Perdas em vazio [W]</i>	<i>Perda total [W]</i>	<i>Tensão de curto-circuito a 75° C [%]</i>
15	4,8	100	440	3,5
30	4,1	170	740	
45	3,7	220	1.000	
75	3,1	330	1.470	
112,5	2,8	440	1.990	
150	2,6	540	2.450	
225	2,3	765	3.465	4,5
300	2,2	950	4.310	

**Figura 24 – Perdas máximas de um transformador definidas pela NBR 5440 [56]**

### 4.3.2 Rendimento e regulação

Durante a operação de um transformador, ocorrem perdas na transferência de energia elétrica do primário para o secundário; sendo a potência útil do secundário menor que do primário. As perdas tem as mesmas origens que nos motores: perdas Joule nos enrolamentos e perdas por histerese e corrente de Foucault no núcleo ferromagnético. O rendimento é a relação entre a potência ativa na saída (secundário) e a potência ativa de entrada (primário). De acordo com a ABNT, o rendimento nominal de um transformador é calculado ou medido sob as seguintes condições de tensão e corrente nominal e fator de potência da carga unitário. A equação do rendimento é dada por (39), e a figura 25 ilustra a curva de rendimento de um transformador.

$$\eta_{\%} = \frac{Vs.Is.\cos\varphi}{Vs.Is.\cos\varphi + PFe + PCu} = \left(\frac{P2}{P1}\right) \cdot 100 \quad (39)$$

$$Fc = \frac{I_2}{I_{2n}} \quad (40)$$

onde

$\eta_{\%}$  = rendimento [%]

$P1$  = potência no primário [W ou múltiplo]

$P2$  = potência no secundário [W ou múltiplo]

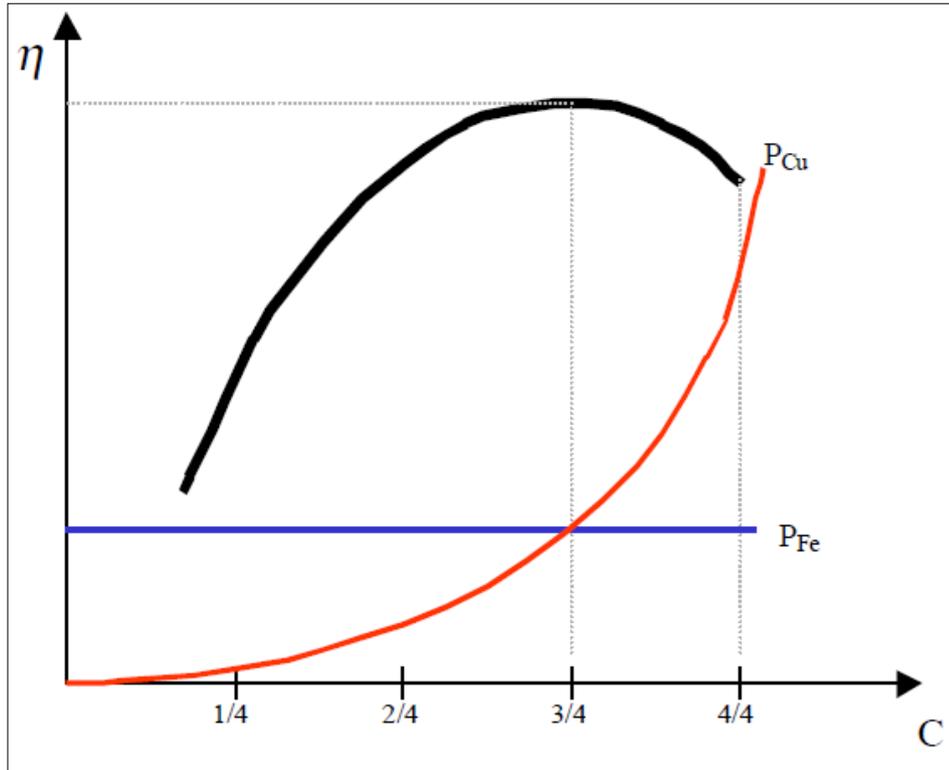
$Fc$  = fator de carga

$I_2$  = corrente no secundário [A]

$I_{2n}$  = corrente nominal no secundário [A]

$PFe$  = perdas no núcleo ferromagnético [W]

$PCu$  = perdas nos enrolamentos (na corrente nominal) [W]



**Figura 25 – Curva de rendimento do transformador [50]**

Como pode-se ver na figura 25, o rendimento de um transformador tem o seu valor máximo quando “ $P_{Fe}$ ” (perdas ferromagnéticas no núcleo) são iguais às “ $P_{Cu}$ ” (perdas no cobre – nos condutores), ou seja quando o fator de carga “ $C$ ” se mantém em torno de  $3/4$ , ou 75%. As perdas no núcleo ferromagnético são praticamente constantes, qualquer que seja a carga do transformador; enquanto que as perdas nos condutores dependem do fator de carga - que depende da resistência e corrente no primário e resistência e corrente do secundário. Portanto para maximizar o rendimento, deve-se optar por um transformador com a menor perda possível nos condutores, e projetar de maneira adequada a potência conforme sua curva de carga.

Modelando o transformador como uma impedância série entre fonte e carga, verifica-se que a circulação de corrente sobre esta impedância levará a uma queda de tensão. Define-se a regulação de tensão para transformadores como sendo a variação da tensão nos terminais do

secundário, quando a este é conectada uma carga. Com o transformador a vazio, no secundário tem-se  $E_2$ , que passa para um valor  $V_2$  ao se ligar uma carga. Se esta variação de  $E_2$  para  $V_2$  é pequena, diz-se que a regulação é boa. A regulação positiva determina uma redução da magnitude de  $V_2$  em relação a  $E_2$ , e o fenômeno está associado ao suprimento de cargas indutivas ou fracamente capacitivas. No caso de uma carga fortemente capacitiva podemos ter uma regulação negativa e neste caso  $V_2$  será maior que  $E_2$ .

$$Reg_{\%} = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \cdot 100 \quad (41)$$

$$Reg_{\%} = (R\% \cdot \cos\varphi \cdot Fc) + (X\% \cdot \sen\varphi \cdot Fc) \quad (42)$$

onde

$Reg_{\%}$  = regulação do transformador [%]

$E_2$  = tensão no secundário sem carga [V]

$V_2$  = tensão no secundário com carga [V]

$R_{\%}$  = resistência percentual [%]

$X_{\%}$  = reatância percentual [%]

A melhor regulação se dá quando o ângulo  $(\varphi_i - \varphi_c)$  for igual a  $90^\circ$ . Nesse caso a carga é de natureza capacitiva. A pior regulação ocorre para cargas cujo ângulo  $(\varphi_i - \varphi_c)$  for igual a  $0^\circ$ .

### 4.3.3 Perdas e eficiência

A eficiência de transformadores de distribuição que operam a plena carga é, em média, 95 a 98 %. Mas esses equipamentos perdem significativa quantidade de energia no processo de magnetização e desmagnetização do material do núcleo, tendo perdas mais acentuadas

quando operando em baixa (ou nenhuma) carga. Estas perdas se manifestam em forma de calor e de ruído (vibração).

Um exemplo de baixa eficiência é nas áreas rurais, que, devido à característica de pequenas cargas e longas distâncias, necessita-se de um grande número de transformadores de baixa capacidade nominal para que o critério de queda de tensão seja atendido - o que contribui para o aumento no valor das perdas reais do sistema.

#### **4.3.4 Soluções para melhorar a eficiência de transformadores**

Do ponto de vista do projeto e construção, o material do núcleo deve possuir alta indução de saturação, alta permeabilidade magnética, alta resistividade, e baixas perdas na frequência de operação; enquanto que o material dos enrolamentos deve ser ter a menor resistividade possível. Materiais do núcleo que melhor atendem essas características são o aço silício (também conhecido como aço elétrico) de grão orientado, que possui propriedades magnéticas otimizadas na direção de sua laminação; e o ferrite (adequado para altas frequências).

Do ponto de vista da escolha do modelo, deve-se fazer um estudo detalhado sobre a curva de carga para poder escolher a potência adequada à aquela aplicação e assim maximizar seu rendimento. Durante sua operação, é importante evitar que o transformador opere com carga superior a nominal; e o carregamento máximo deve situar-se em torno de 80 %.

Para incentivar o uso de transformadores eficientes, deve-se promover pacotes com o objetivo de promover uma estrutura regulatória, incentivos financeiros (para que os consumidores possam se beneficiar da eficiência melhorada dos transformadores de distribuição) e normas voluntárias (ou compulsórias) de eficiência energética.

#### 4.4 Fator de Potência em máquinas elétricas

Quando máquinas elétricas são alimentadas por corrente alternada, a característica indutiva (de motores e transformadores) se manifesta na forma de um atraso da corrente em relação à tensão aplicada. Para medir este atraso, usa-se o fator de potência (FP). O FP é o quociente da potência ativa (kW) pela potência aparente (kVA). É o cosseno do ângulo “ $\varphi$ ”; onde  $\varphi$  é a diferença do ângulo (a defasagem) da tensão em relação ao ângulo da corrente. As relações básicas estão formuladas de (43) a (46) [45].

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\varphi \quad (43)$$

$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (44)$$

$$S = V \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (45)$$

$$Q = \sqrt{P^2 + S^2} \quad (46)$$

onde

FP = Fator de Potência [0 a 1]

P = Potência ativa [W] ou “potência útil”

S = Potência aparente [VA]

V = tensão quadrática média [V]

I = corrente quadrática média [A]

Q = Potência reativa [VAr]

A importância econômica do FP é devido ao fato que a potência reativa, além de não produzir potência útil nas máquinas e gerar perdas pelo aquecimento dos condutores, quando excede um certo nível, é taxada na forma de uma “multa” [51] [52]. O art. 64 da Resolução

nº 456, de 29.11.2000, da ANEEL [53], estabelece um nível máximo para a utilização de energia reativa pela unidade consumidora, em função da energia ativa consumida. Por este princípio, o nível máximo de energia reativa fornecida, sem cobrança, é o definido pelo fator de potência de referência = 92% ou 0,92. Valores inferiores indicam excedente de reativo, que será faturado na conta de energia elétrica. Na estrutura tarifária convencional a energia e a demanda reativas excedentes são mensuradas através do fator de potência médio mensal.

O FP médio mensal é calculado com base nos valores medidos mensalmente de energia ativa (kWh) e energia reativa (KVArh). O FP horário é calculado com base nos valores de energia ativa e energia reativa medidos de hora em hora. No período de seis horas consecutivas, compreendendo o horário entre 23h30m e 06h30m, as concessionárias consideram apenas a energia reativa capacitiva verificada, para o cálculo do FP horário. Durante o período diário complementar a este, as concessionárias consideram apenas a energia reativa indutiva verificada, para o cálculo do FP horário.

#### **4.4.1 Causas de um baixo fator de potência**

Segundo [52] e [54], as causas mais comuns para uma elevação do consumo de energia reativa, e conseqüentemente um baixo fator de potência são:

- a) Nível de tensão da instalação acima da nominal, provocando um aumento do consumo da energia reativa;
- b) Motores de indução trabalhando a vazio durante grande parte do tempo;
- c) Motores superdimensionados para as respectivas cargas;
- d) Transformadores ligados em vazio (ou pouca carga), por longos períodos;
- e) Reatores de baixo fator de potência no sistema de iluminação;
- f) Grande quantidade de motores de pequena potência;

- g) Fornos de indução ou a arco;
- h) Máquinas de tratamento térmico ou de solda.

#### **4.4.2 Consequências de um baixo fator de potência**

Além do custo adicional da energia (cobrança de energia e demanda reativa excedentes), as instalações correm vários riscos:

- a) Variações de tensão que, por sua vez, podem ocasionar a queima de motores;
- b) Aumento das perdas elétricas na linha de distribuição pelo efeito Joule;
- c) Redução do aproveitamento da capacidade dos transformadores de alimentação;
- e) Sobrecarga nos equipamentos de manobra, limitando sua vida útil;
- f) Necessidade de aumento do diâmetro dos condutores e da capacidade dos equipamentos de manobra e proteção (sobredimensionamento).

#### **4.4.3 Vantagens da correção do fator de potência**

Efetuando-se uma correção adequada do fator de potência, obtém-se vantagens tanto para a empresa, quanto para a concessionária. As vantagens para a empresa são:

- a) Redução significativa do custo de energia elétrica;
- b) Aumento da eficiência energética da empresa;
- c) Melhoria da tensão (menor flutuação do nível médio de tensão);
- d) Aumento da capacidade dos equipamentos de manobra;
- e) Aumento da vida útil das instalações e equipamentos;
- f) Redução do efeito Joule e conseqüente menor aquecimento do ambiente;
- g) Redução da corrente reativa na rede elétrica.

#### 4.4.4 Métodos para correção do fator de potência

A existência de alternativas de enquadramento tarifário permite a alguns consumidores escolher o enquadramento e valor contratual de demanda que resultam em menor despesa com a energia elétrica. A decisão, porém, só deve ser tomada após adequada verificação dos padrões de consumo e demanda nos segmentos horários (ponta e fora de ponta) e sazonais (períodos seco e úmido). Além de revelar relações entre hábitos e consumo de energia elétrica, úteis ao se estabelecer rotinas de combate ao desperdício, a análise da conta de luz é a base para a avaliação econômica dos projetos de eficiência eletro-energética.

Para melhorar o FP deve-se reduzir o consumo de energia reativa, ou seja, solicitar menos energia reativa da concessionária. Existem duas opções, que não são mutuamente exclusivas, para a correção do FP: as medidas operacionais e a instalação de um banco de capacitores.

Medidas operacionais visam eliminar as distorções que porventura existam na instalação. Essas medidas são: verificação do nível de tensão da instalação; elevação do consumo de quilowatt-hora (diminuindo proporcionalmente o consumo de kVAr), dimensionamento correto dos motores, transformadores e outros equipamentos; e a utilização e operação conveniente dos equipamentos, como motores e transformadores. A outra medida, que possui vantagens econômicas e de segurança, é a instalação de um banco de capacitores.

Um banco de capacitores é um conjunto de unidades capacitivas - e seu respectivo equipamento de montagem e encapsulamento, incluindo manobra, proteção e controle. A aplicação destes bancos capacitivos é regulada pela norma ABNT NBR 5060:1977 – Guia para instalação e operação de capacitores de potência. Além da norma, as concessionárias de energia também possuem uma série de requerimentos a serem atendidos pela unidade consumidora. Podem ser instalados sistemas monofásicos, bifásicos e trifásicos.



**Figura 26 – Bancos de capacitores**

A correção pode ser feita instalando os capacitores de quatro maneiras diferentes, tendo como objetivos a conservação de energia e a relação custo/benefício:

a) Correção na entrada da energia de alta tensão: corrige o fator de potência visto pela concessionária, permanecendo internamente todos os inconvenientes citados pelo baixo fator de potência e o custo é elevado.

b) Correção na entrada da energia de baixa tensão: permite uma correção bastante significativa, normalmente com bancos automáticos de capacitores. Utiliza-se este tipo de correção em instalações elétricas com elevado número de cargas com potências diferentes e regimes de utilização pouco uniformes. A principal desvantagem consiste em não haver alívio sensível dos alimentadores de cada equipamento.

c) Correção por grupos de cargas: o capacitor é instalado de forma a corrigir um setor ou um conjunto de pequenas máquinas (menor que 10 CV). É instalado junto ao quadro de distribuição que alimenta esses equipamentos. Tem como desvantagem não diminuir a corrente nos circuitos de alimentação de cada equipamento.

d) Correção localizada: é obtida instalando-se os capacitores junto ao equipamento que se pretende corrigir o fator de potência. Representa, do ponto de vista técnico, a melhor solução, apresentando as seguintes vantagens: reduz as perdas energéticas em toda a instalação; diminui a carga nos circuitos de alimentação dos equipamentos; pode-se utilizar em sistema único de acionamento para a carga e o capacitor, economizando-se um equipamento de manobra; gera potência reativa somente onde é necessário.

e) Correção mista: utiliza várias das técnicas apresentadas anteriormente. Do ponto de vista “Conservação de Energia”, considerando aspectos técnicos, práticos e financeiros, torna-se a melhor solução.

A correção mista usa as seguintes metodologias, listadas na tabela 19:

**Tabela 19 – Metodologias de bancos de capacitores (correção mista)**

<b>Caso</b>	<b>Correção</b>
Motor (potência $\geq$ 10 CV)	Correção local
Motor (potência < 10 CV)	Correção por grupos
Rede de iluminação (usando reatores de baixo FP)	Correção na entrada da rede

Fonte: [54] catálogo WEG de correção de FP

As medidas mostradas na tabela 19 são as medidas a serem adotadas pontualmente dentro da instalação a ser regulada. Além destas medidas, deve-se instalar capacitor fixo diretamente no lado secundário do transformador; e um banco automático de pequena potência para equalização final na entrada de energia.

Quando se corrige um fator de potência de uma instalação, consegue-se um aumento de potência aparente disponível e também uma queda significativa da corrente. Após a correção do fator de potência, a instalação poderá ter aumentos de cargas.

O ganho econômico da correção do fator de potência depende muito do caso. Deste ganho econômico, o mais fácil de ser calculado é a cobrança de reativos – nesse caso, a total redução da cobrança deste termo na conta de energia. Os valores arrecadados com os outros benefícios oriundos da correção do fator de potência – como melhoria da tensão e o consequente aumento da vida útil das instalações e equipamentos – são mais difíceis de determinar.

## **5. IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS DE DESPERDÍCIO**

### **5.1 Introdução**

Este tópico tem como objetivo condensar as técnicas e dados angariados neste projeto, e apresentá-los de uma maneira diferenciada. Foram montadas três figuras, uma para cada subtipo principal de consumidor: residencial, comercial e industrial. As legendas coloridas (verde e laranja) se referem à quantidade de energia que pode ser economizada – que depende de cada item destacado. As legendas “1” e “2” tratam de mostrar a metodologia mais adequada para a otimização da eficiência energética daquele item. Se referem, respectivamente, à escolha adequada do item (como optar por uma lâmpada fluorescente compacta ao invés de uma incandescente) e ao uso de acessórios para diminuir o consumo (como reatores com alto FP e rendimento, ou motores com acionamentos de velocidade variável).

### 5.2 “Mapa” do desperdício - Residencial

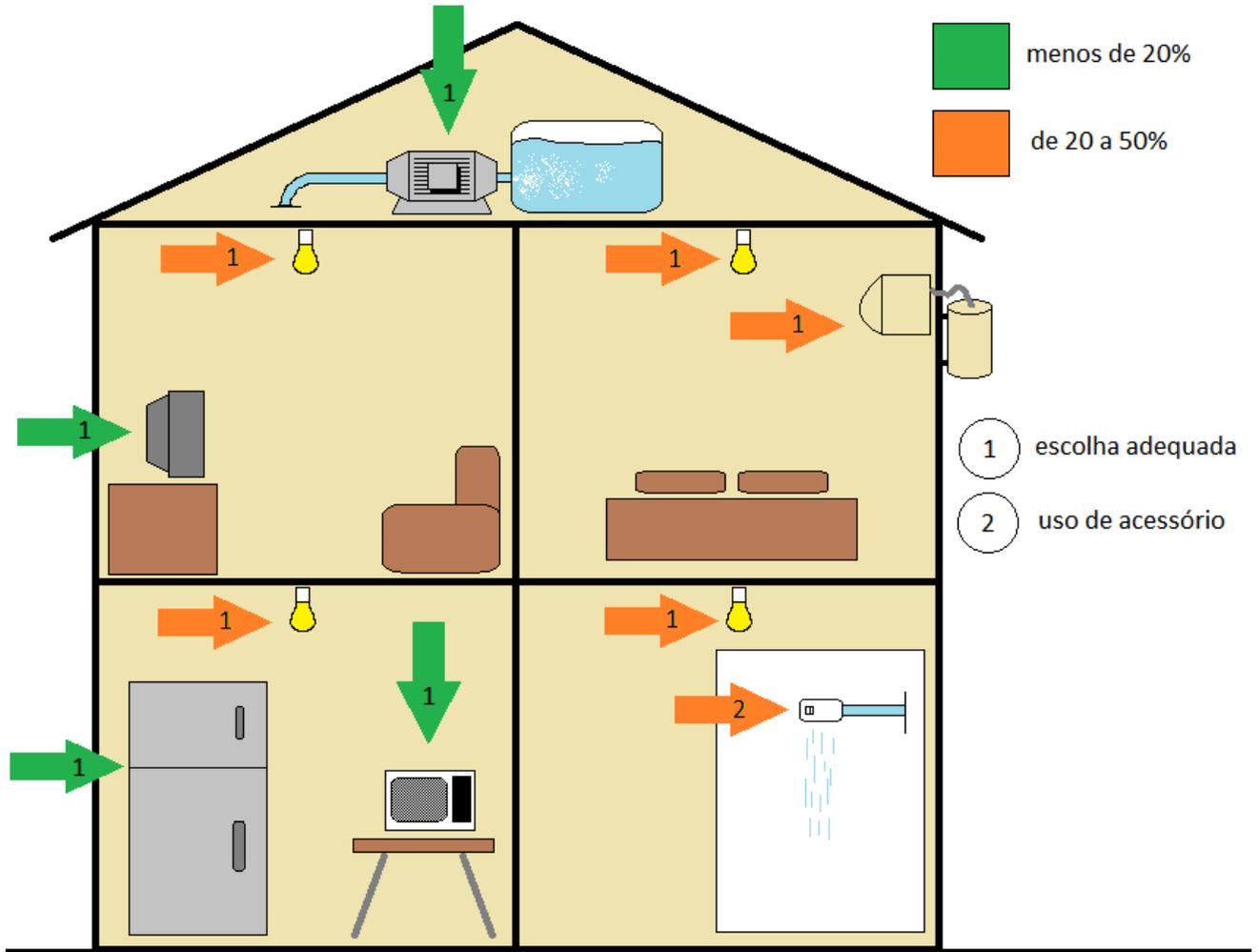


Figura 27 – “Mapa” do desperdício de uma residência

### 5.3 “Mapa” do desperdício - Comercial

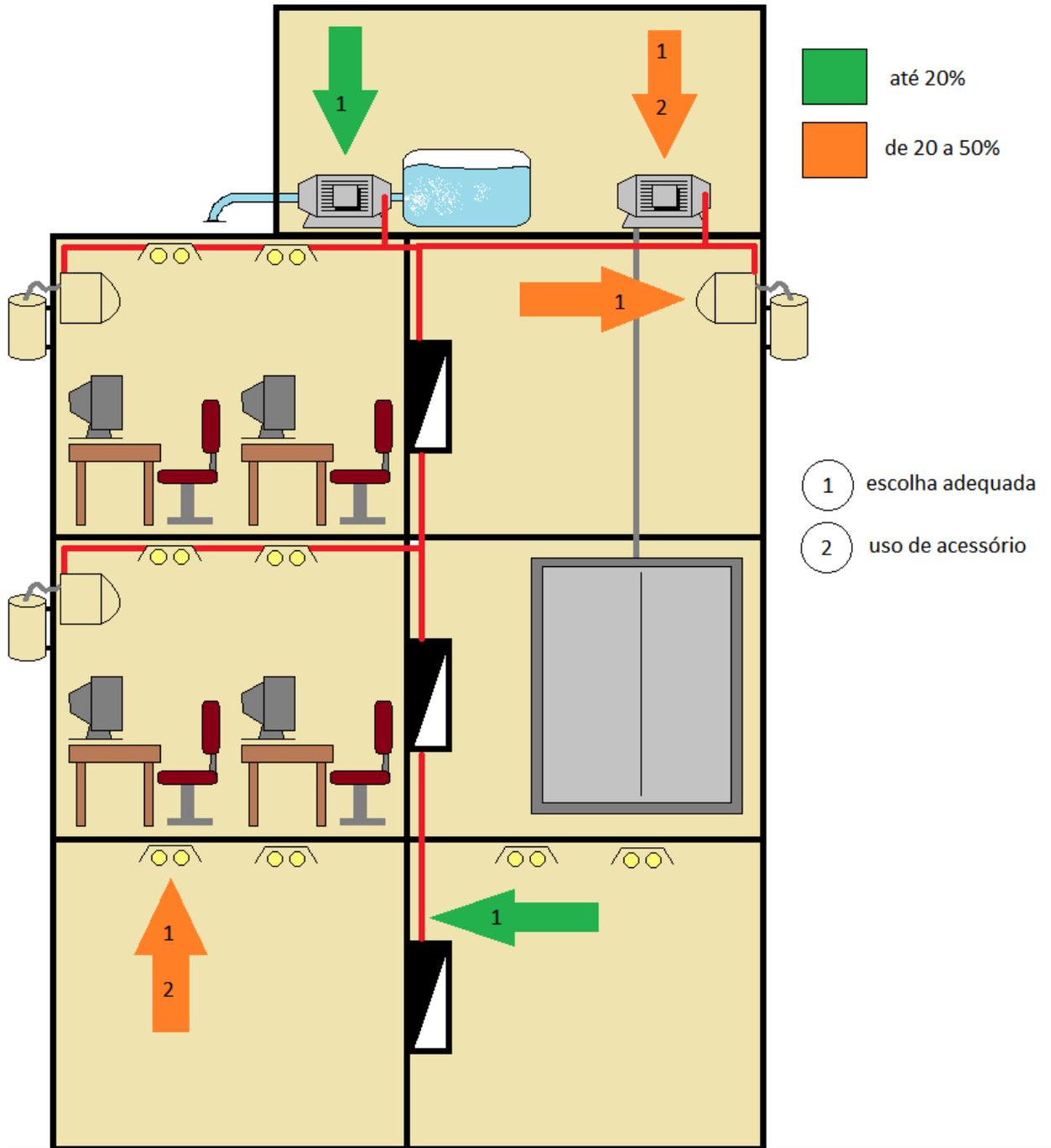


Figura 28 – “Mapa” do desperdício de um edifício comercial

### 5.4 “Mapa” do desperdício – Industrial

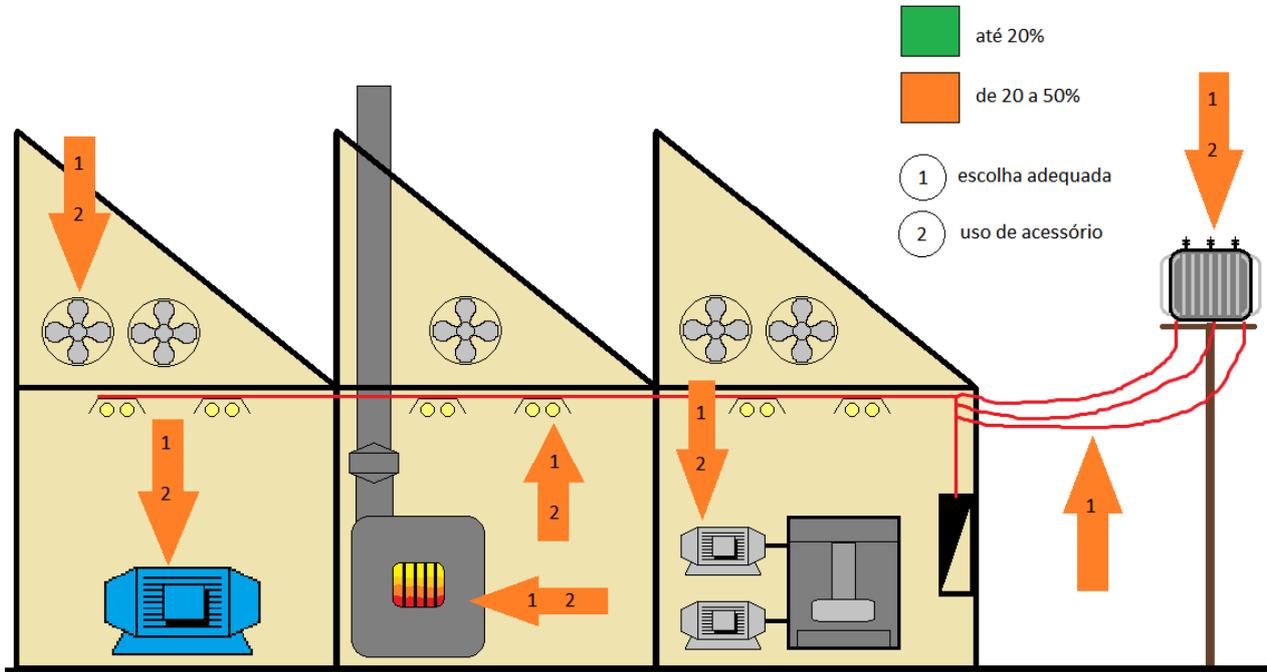


Figura 29 – “Mapa” do desperdício de uma indústria

## 6. CONCLUSÃO

Quanto às metodologias apresentadas, pode-se dizer que não há “surpresas”, pois elas são de conhecimento público ou de fácil acesso. As razões porque essas metodologias não são aplicadas são diversas, e depende diretamente do tipo de consumidor de energia.

O consumidor de energia residencial geralmente deixa de aplicar os métodos de eficiência energética por falta de informação e/ou de interesse. Este consumidor pode optar por eletrodomésticos mais eficientes, mas as vezes deixa de fazê-lo por preferir o conforto ou design à economia. Um exemplo disso são as televisões modernas, de plasma, LED ou LCD. Para estas televisões, o quesito eficiência energética dificilmente entra no pauta quando o consumidor está escolhendo o modelo. Por outro lado, há um grande avanço na eficiência da iluminação de residências, pois ocorreu uma disseminação da lâmpada fluorescente compacta. Apesar de não ter sido mencionado anteriormente por não pertencer a uma categoria estudada, o chuveiro elétrico deveria ser reconsiderado como única alternativa de aquecimento de água, pois a sua curva de carga (picos muito grandes de consumo por curtos períodos de tempo) é muito prejudicial à rede de distribuição, causando um superdimensionamento dos condutores e transformadores.

O consumidor de energia comercial de pequena escala, assemelha-se a um consumidor residencial, quando se refere ao comportamento em relação à eficiência energética. O consumidor de energia comercial de grande escala (grandes edificações e lojas), por operar com mais equipamentos, deve dedicar mais atenção a questão da eficiência. De preferência, a efficientização deve começar na etapa do projeto, visando iluminação e condutores. As razões que levam a um consumidor de energia comercial a não optar por medidas que levem à

economia de energia, são provavelmente a falta de informação, ou a falta de recursos naquele momento para implementar tais medidas.

O consumidor de energia industrial é o que tem maior possibilidade de benefícios com a efficientização energética; visto que a sua produção depende diretamente da quantidade de energia consumida. Deste modo, uma empresa energeticamente eficiente ganha competitividade ao reduzir seus custos com energia, além de poder se candidatar a “selos verdes” e outros selos de qualificação ISO. As razões que levam a um consumidor de energia industrial a não optar por medidas que levem à economia de energia, são provavelmente a falta de informação, ou a falta de recursos naquele momento para implementar tais medidas. Outro fato importante que deve ser considerado é que a instalação de aparelhos ou medidas que levam à efficientização energética irão interromper a produção em um determinado momento, e irão acrescentar novas rotinas de manutenção à empresa – fato negativo do ponto de vista do empresário, que geralmente opta pelo “deixar como está”.

Finalmente, deve-se dizer que a responsabilidade, e mais importante – a decisão de economizar energia, cabe a todos os consumidores de energia elétrica; sejam eles residenciais, comerciais ou industriais. E os beneficiados pela decisão de economizar energia serão toda a sociedade e o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ernst & Young. **Brasil sustentável: Desafios do mercado de energia**. 2008. 26 p. Disponível em <[http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Brasil\\_Sustent%C3%A1vel\\_-\\_Potencial\\_de\\_Consumo/\\$FILE/Crescimento\\_economico\\_e\\_potencial\\_de\\_consumo.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Brasil_Sustent%C3%A1vel_-_Potencial_de_Consumo/$FILE/Crescimento_economico_e_potencial_de_consumo.pdf)> Acesso em: 15 Ago. 2010.
- [2] Energy Information Administration. **Internation Energy Annual 2006**. 2010. 20 p. Disponível em <[http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/Notes%20for%20Table%20E\\_1p.html](http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/Notes%20for%20Table%20E_1p.html)> Acesso em: 25 Ago. 2010.
- [3] Site Wikipédia. **Verbetes sobre Intensidade Energética**. 2010. Disponível em <[http://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_intensity](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_intensity)> Acesso em: 25 Ago. 2010.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica. **Informações gerenciais**. 2010. 6 p. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=531>> Acesso em: 25 Ago. 2010.
- [5] Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2010**. 2010. 58 p. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2010.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf)> Acesso em: 12 Set. 2010.
- [6] Commission of the European Communities. **“Doing More With Less” - Green Paper on Energy Efficiency**. 2005. 51 p. Disponível em <[http://ec.europa.eu/energy/efficiency/doc/2005\\_06\\_green\\_paper\\_book\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/doc/2005_06_green_paper_book_en.pdf)> Acesso em: 12 Set. 2010.
- [7] ASEA Brown Boveri Ltda. **Background information - Energy efficiency**. 2010. 28 p. Disponível em <<http://www.abb.com.br/>> Acesso em: 12 Set. 2010.
- [8] Site da Energy Information Administration. **Weekly Retail Prices**. Disponível em <[http://www.eia.gov/dnav/pet/pet\\_pri\\_gnd\\_dcus\\_nus\\_w.htm](http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_gnd_dcus_nus_w.htm)> Acesso em: 25 Ago. 2010.

[9] Site Wisconsin K-12 Energy Education Program. **Section C: Measuring and Quantifying Energy.** Disponível em <http://www.uwsp.edu/cnr/wcee/keep/Mod1/Whatis/energyresourcetables.htm> Acesso em: 12 Set. 2010.

[10] Site da Associação Brasileira de Empresas de Serviços de Conservação de Energia. 2010. Disponível em <http://www.abesco.com.br>. Acesso em: 15 Ago. 2010.

[11] Instituto Nacional de Eficiência Energética, **Montagem de um contrato de performace – Questões chave.** Versão digital. 2010. 22 p. Disponível em [http://www.inee.org.br/download/escos/Montagem\\_Contrato\\_Performance.pdf](http://www.inee.org.br/download/escos/Montagem_Contrato_Performance.pdf) Acesso em: 18 Ago. 2010.

[12] CUNHA, LÍVIA. **Edição eletrônica da Revista O Setor Elétrico - Edição 54.** 2010. Disponível em <http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/57-artigos-e-materias/406-pnef-deve-sair-ate-o-fim-do-ano.html> Acesso em: 12 Set. 2010.

[13] AUTOR. Revista Lumière Electric. **“COBEE: um evento voltado para eficiência energética”.** Edição 147, Página 86, MES 2010. ISSN 8106338-1

[14] SENNA, DENNYS; NASCIMENTO, CAROLINA. **Site da EletroAcre – Programas de Eficiência Energética e Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico.** Disponível em <http://www.eletoacre.com.br/a-empresa/pee-e-pd> Acesso em: 29 Ago. 2010.

[15] ASEA Brown Boveri Ltda. **Technical note on IEC 60034-2-1 standard on efficiency measurement methods for low voltage AC motors.** 2009. 2 p. Disponível em [http://library.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/52fef7ec55eacc91c1257582004d5062/\\$File/TMO18%20Rev%20B%202009\\_230309.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/52fef7ec55eacc91c1257582004d5062/$File/TMO18%20Rev%20B%202009_230309.pdf) Acesso em: 25 Ago. 2010.

[16] ASEA Brown Boveri Ltda. **Eureka Magazine – New efficiency categories for motors.** Maio de 2010. Periódico eletrônico Eureka Magazine. Disponível em

<<http://www.eurekamagazine.co.uk/abb/news/Default.aspx>> Acesso em: 25 Ago. 2010.

[17] Site da Energy Star. Disponível em <<http://www.energystar.gov/>> Acesso em: 12 Set. 2010.

[18] Site da TCO certification. Disponível em <<http://www.tcodevelopment.com/>> Acesso em: 12 Set. 2010.

[19] Site da companhia elétrica de Brasília. **Link de informações sobre PROCEL.**  
<[http://www.ceb.com.br/Ceb/Ceb/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1032](http://www.ceb.com.br/Ceb/Ceb/visualizar_texto.cfm?idtxt=1032) > Acesso em: 28 Ago. 2010.

[20] Site da Eletrobrás. **Link de informações sobre PROCEL.** Disponível em <<http://www.eletronbras.gov.br/elb/procel/main.asp?TeamID={95F19022-F8BB-4991-862A-1C116F13AB71}>> Acesso em: 12 Set. 2010.

[21] Site da CONPET. Disponível em <<http://www.conpet.gov.br/>> Acesso em: 12 Set. 2010.

[22] Site do INMETRO. **Tabelas de consumo energético.** Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>> Acesso em: 30 Ago. 2010.

[23] BARBOSA, VANESSA. Site do Portal Exame – editora Abril. **Prédios com etiqueta de eficiência energética economizam até 40 % de luz.** Disponível em <<http://portalexame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/noticias/predios-etiqueta-eficiencia-energetica-economizam-40-luz-590659.html>> Acesso em: 12 Set. 2010.

[24] BARBOSA, V. Site do Portal Exame – editora Abril. **Construções sustentáveis ganham mercado no Brasil.** Disponível em <<http://portalexame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/noticias/construcoes-sustentaveis-ganham-mercado-brasil-589607.html>> Acesso em: 12 Set. 2010.

[25] Site do Banco Nacional de Desenvolvimento. **BNDES ProCopa Turismo – Hotel Sustentável.** 2010. Disponível em

<[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Apoio\\_Financeiro/Programas\\_e\\_Fundos/ProCopaTurismo/hotel\\_sustentavel.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Programas_e_Fundos/ProCopaTurismo/hotel_sustentavel.html)> Acesso em: 12 Set. 2010.

[26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-IEC-60287-3-2: Cabos elétricos – Cálculo da corrente nominal – Condições de operação – Otimização econômica das seções dos cabos de potência.** Rio de Janeiro, 2009. 28 p.

[27] International Standard **.IEC 60287-3-2:1995.** Electric cables – Calculation of the current rating – Part 3-2:Sections on operating conditions – Economic optimization of power cable size. Genebra, Suíça, 1995. 15 p. Disponível em <[www.iec.ch](http://www.iec.ch)>. Acesso em 1 Set. 2010.

[28] MORENO, H. **Dimensionamento econômico e ambiental de condutores elétricos.** São Paulo: Instituto Procobre Brasil, 2010. 36 p. Disponível em <<http://leonardo-energy.org/portugues/?p=411>>. Acesso em: 1 Nov. 2010.

[29] HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J; **Fundamentos de Física volume 3: Eletromagnetismo.** Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S/A, 1996. 292 p. ISBN: 85-216-1070-X.

[30] PACHECO, C. R.; SOUTO, C. N.; TEIXEIRA, M. D.; OLIVEIRA, J. C. **Uma Metodologia para o Dimensionamento Econômico/Otimizado de Cabos Isolados Perante Condições Não-Senoidais de Operação.** In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2003, Aracaju, SE, Brasil. p. 1-6. Disponível em <<http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/cabosEconomia.pdf>> Acesso em: 12 Set. 2010.

[31] NEXANS, **Nexans Ficap Tabela de preços - setembro 2010 ver 1.** 2010. 7 p. Disponível em <[www.nexans.com.br](http://www.nexans.com.br)>. Acesso em 1 Nov 2010.

[32] PRYSMIAN, **Linha de produtos – uso geral:** Tabela de preços – agosto 2010. 2010. 4 p. Disponível em <[www.prysmianclub.com.br](http://www.prysmianclub.com.br)>. Acesso em 1 Nov 2010.

[33] MORENO, H. **Guia EM da NBR 5410.** São Paulo: Editora Aranda, 2001. 291 p.

[34] MORENO, H. **Dimensionamento econômico de condutores elétricos – um caminho para economizar energia**. São Paulo: Instituto Procobre Brasil, 2003. 14 p. Disponível em <[http://www.procobre.org/pr/cobre\\_para\\_especialistas/](http://www.procobre.org/pr/cobre_para_especialistas/)>. Acesso em 1 Nov 2010.

[35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413**: Iluminância de interiores. Rio de Janeiro, 1992, 13 p.

[35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5461**: Iluminação - Terminologia. Rio de Janeiro, 1991, 68 p.

[37] OSRAM. **Iluminação: Conceitos e Projetos**. 2010. 31 p. Disponível em <[http://br.osram.info/download\\_center/manual\\_luminotectico.htm](http://br.osram.info/download_center/manual_luminotectico.htm)>. Acesso em 15 Nov 2010.

[38] MARCHIORI, J. **Luminotécnica**. UNICAMP, 2010. 36 p. Disponível em <<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/Luminotecnica.pdf>>. Acesso em 15 Nov 2010.

[39] PHILIPS. **Lamps & Lighting Electronics**: Catalogue 2009. 2009. 310 p. Disponível em <[www.lighting.philips.co.uk/pwc\\_li/gb\\_en/connect/modules/section/Lamps\\_and\\_gear.pdf](http://www.lighting.philips.co.uk/pwc_li/gb_en/connect/modules/section/Lamps_and_gear.pdf)>. Acesso em 15 Nov 2010.

[40] VALENTIM, A. A.; FERREIRA, H. S. COLETTI, M. **Lâmpadas de Led: Impacto no Consumo e Fator de Potência**. Revista Ciências do Ambiente On-Line Junho, 2010 Volume 6, Número 1. Campinas: 2010. Disponível em <<http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/include/getdoc.php%3Fid%3D741%26article%3D231%26mode%3Dpdf>>. Acesso em 15 Nov 2010.

[41] FREITAS, L. A era dos LEDs. **REVISTA LUMIÈRE ELECTRIC**. São Paulo: Editora Lumière, 2010. Ed. 143, p. 72-79, mar. 2010.

[42] CASTANO, E.; ZISSIS, G. Perspectivas e obstáculos ao LED branco como fonte de luz. **REVISTA ELETRICIDADE MODERNA**, São Paulo: Editora Aranda. Ed. 408, p. 104-117, jan. 2008.

[43] COSTA, G. J. C. **Iluminação Econômica – cálculo e avaliação**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2005. 3ª ed. 562 p. ISBN 85-7430-538-3.

[44] VIANNA, N. S.; GONÇALVES, J. C. S.; **Iluminação e Arquitetura**. São Paulo: Editora Virtus s/c Ltda, 2001. 378 p. ISBN 85-902193-1-3.

[45] FITZGERALD, A. E. et al. **Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: Bookman, 1990. 599 p. ISBN: 978-85-60031-04-7.

[46] PIRES, W. L; MELLO, H. G. Minimização de perdas com a solução do fluxo ótimo. **REVISTA ELETRICIDADE MODERNA**, São Paulo: Editora Aranda. Ed. 394, p. 88-106, jan. 2007.

[47] PEÑALBA, L.F.; PARDO, J. A. Utilização de acionamentos de velocidade variável em motores de um indústria química. **REVISTA ELETRICIDADE MODERNA**, São Paulo: Editora Aranda. Ed. 399, p. 56-67, jul 2007.

[48] GUDBJERG, E.; ANDERSEN, H. Uso de revestimentos para reduzir o consumo de bombas e ventiladores. **REVISTA ELETRICIDADE MODERNA**, São Paulo: Editora Aranda. Ed. 412, p. 74-84, jul. 2008.

[49] BARBOSA, R. R.; et al. Eficiência energética em métodos de controle de vazão. **REVISTA ELETRICIDADE MODERNA**, São Paulo: Editora Aranda. Ed. 425, p. 84-93, ago. 2009.

[50] PAIVA, E.; **Apostila de Máquinas Elétricas – Transformadores**, Escola Superior de Tecnologia de Viseu. 13 p. Disponível em <<http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/eduardop/MqE/transformadores.pdf>> Acesso em 25 Nov 2010.

[51] Programa nacional de conservação de energia elétrica - PROCEL. **MANUAL DE TARIFAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA**. 1ª edição, 2001. 44 p. Disponível em

<[http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/energia/Manual\\_de\\_Tarifacao.pdf](http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/energia/Manual_de_Tarifacao.pdf)>. Acesso em 15 Nov 2010.

[52] Centrais Elétricas de Santa Catarina - **CELESC Site institucional**. Link sobre Apuração do fator de potência. Disponível em <[http://portal.celesc.com.br/portal/grandesclientes/index.php?option=com\\_content&task=view&id=134&Itemid=215](http://portal.celesc.com.br/portal/grandesclientes/index.php?option=com_content&task=view&id=134&Itemid=215)> Acesso em: 15 Nov. 2010.

[53] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **RESOLUÇÃO N.º 456**. 2000. 60 p. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf>> Acesso em: 15 Nov. 2010.

[54] WEG. **Manual para Correção do Fator de Potência**. 2009. 34 p. Disponível em <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em 15 Nov 2010.

[55] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356** Transformadores de potência – especificação. Rio de Janeiro, 1993.

[56] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5440** Transformadores para redes aéreas de distribuição – padronização. Rio de Janeiro, 1999.

[57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5380** - Transformadores de potência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1993.